



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

ESCUELA DE POSGRADO  
PROGRAMA ACADÉMICO DE MAESTRÍA EN GERENCIA DE  
OPERACIONES Y LOGÍSTICA

**Optimización en la elaboración de botellas pet en  
una planta embotelladora y su impacto en la  
industria de bebidas y el medio ambiente**

TESIS PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:  
Maestro en Gerencia de Operaciones y Logística

**AUTOR:**

Santa Cruz Vega, Julio Ernesto (orcid.org/0000-0001-9359-4490)

**ASESOR:**

Dr (c). Zelada García, Gianni Michael (orcid.org/0000-0003-2445-3912)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Administración de Operaciones

**LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:**

Desarrollo sostenible y adaptacional cambio climático

LIMA – PERÚ

2022

## **Dedicatoria**

A mis Padres: Sergio y Teresa, porque ellos han sido la fuente de inspiración de mi formación personal, por motivarme en el estudio desde que yo era pequeño, por aconsejarme, por corregirme y por mil y un razones más por las que estoy orgulloso de que sean mis padres, y que sin sus enseñanzas no hubiera podido alcanzar esta meta. Gracias.

## **Agradecimiento**

Primeramente a Dios nuestro Creador quien hace posible todas las cosas.

Al Dr (c). Gianni Michael Zelada García y al Dr. Hítalo César Gutiérrez Romero por su tiempo y asesoría para la culminación de este trabajo de investigación con el que se obtendrá el título de maestro. Sin su apoyo no sería posible la culminación de este trabajo. Gracias.

## Índice de contenidos

Carátula .....	i
Dedicatoria .....	ii
Agradecimiento.....	iii
Índice de contenidos.....	iv
Índice de tablas.....	v
Índice de gráficos y figuras .....	v
Resumen .....	vi
Abstract .....	vii
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. MARCO TEÓRICO .....	8
III. METODOLOGÍA .....	22
3.1. Tipo y diseño de investigación .....	22
3.2. Variables y operacionalización .....	23
3.3. Población (criterios de selección), muestra, muestreo, unidades de análisis..	28
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	29
3.5. Procedimientos .....	29
3.6. Método de análisis de datos.....	30
3.7. Aspectos éticos.....	31
IV. RESULTADOS.....	32
V. DISCUSIÓN.....	48
VI. CONCLUSIONES .....	60
VII. RECOMENDACIONES .....	62
REFERENCIAS .....	63
ANEXOS.....	70

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Variación del Peso del envase y Ahorro de material vs Diámetro y Altura de Envases de 1500 ml .....	35
<b>Tabla 2.</b> Variación del Peso del envase y Ahorro de material vs Diámetro y Altura de Envases de 1000 ml .....	40
<b>Tabla 3.</b> Variación del Peso del envase y Ahorro de material vs Diámetro y Altura de Envases de 500 ml .....	44
<b>Tabla 4.</b> Matriz de consistencia.....	71
<b>Tabla 5.</b> Matriz de operacionalización de variables .....	72

## Índice de gráficos y figuras

<b>Figura 1.</b> Peso de una botella pet de 1500 cc vs diámetro y altura .....	37
<b>Figura 2.</b> Ahorro de material en botella pet de 1500 cc vs diámetro y altura .....	38
<b>Figura 3.</b> Peso de una botella pet de 1500 cc vs diámetro y altura en 3D.....	39
<b>Figura 4.</b> Peso de una botella pet de 1000 cc vs diámetro y altura .....	41
<b>Figura 5.</b> Ahorro de material en botella pet de 1000 cc vs diámetro y altura .....	42
<b>Figura 6.</b> Peso de una botella pet de 1000 cc vs diámetro y altura en 3D.....	43
<b>Figura 7.</b> Peso de una botella pet de 500 cc vs diámetro y altura .....	45
<b>Figura 8.</b> Ahorro de material en botella pet de 500 cc vs diámetro y altura .....	46
<b>Figura 9.</b> Peso de una botella pet de 500 cc vs diámetro y altura en 3D.....	47

## **Resumen**

El presente trabajo de investigación tiene por objetivo realizar un estudio para la optimización en la elaboración de envases pet en la industria de bebidas, desde la perspectiva de minimizar el peso de los envases; para lo cual se ha utilizado un modelo de optimización volumétrico desarrollado mediante una ecuación matemática que relaciona el peso del envase en función de su altura y diámetro, manteniendo constante su espesor y su volumen o capacidad; luego, a dicha ecuación se le aplicó la derivada y a la ecuación resultante se le igualó a cero, con lo que se obtuvo el valor del diámetro y de la altura del envase para el cual el peso es el mínimo. Esta propuesta surgió como una necesidad que tienen las empresas de la industria de bebidas, de reducir los costos de fabricación de los envases y con ello, reducir la cantidad de material pet que es desechado al ambiente. Para el desarrollo de este trabajo se utilizó el tipo de investigación aplicada, diseño de investigación no experimental, enfoque cuantitativo y nivel de investigación descriptivo-explicativo. La población se definió como los lotes de botellas pet elaboradas en una embotelladora; la muestra estuvo formada por las botellas Pet de 1,500 ml, 1,000 ml y 500 ml; se utilizó el muestreo estratificado y como técnicas de recolección de datos, la documentación y la observación.

Los resultados obtenidos aplicando el modelo de optimización volumétrico a los envases de 500 ml, 1,000 ml y 1,500 ml muestran que se pueden lograr ahorros de hasta 6.4%, 7% y 10% respectivamente en el peso de los envases pet, manteniendo constante: su espesor, su calidad, su resistencia mecánica y su baja permeabilidad a gases y vapores. Se concluye que el modelo matemático de optimización volumétrico tiene un alto impacto en la industria de envases, ya que puede generar un ahorro considerable de material de hasta 10% y por lo tanto reducir los costos de fabricación, lo cual representa también una reducción en el impacto ambiental. Además, el modelo de optimización, permite elegir las dimensiones del envase, con el menor peso, y que a la vez mantenga su calidad, reduzca los costos y sea atractivo estéticamente.

### **Palabras clave:**

Envase, empaque, optimización, diámetro, altura, peso.

## **Abstract**

The objective of this research work is to carry out a study for the optimization in the elaboration of pet containers in the beverage industry, from the perspective of minimizing the weight of the containers; For this purpose, a volumetric optimization model has been used, developed by means of a mathematical equation that relates the weight of the container as a function of its height and diameter, keeping its thickness and volume or capacity constant; then, the derivative was applied to this equation and the resulting equation was equaled to zero, thus obtaining the value of the diameter and height of the container for which the weight is the minimum. This proposal arose as a need of the beverage industry companies to reduce the manufacturing costs of containers and thus reduce the amount of pet material that is discarded into the environment. For the development of this work, the type of applied research, non-experimental research design, quantitative approach and descriptive-explanatory research level were used. The population was defined as the batches of pet bottles produced in a bottling plant; the sample consisted of 1,500 ml, 1,000 ml and 500 ml pet bottles; stratified sampling was used and documentation and observation were used as data collection techniques.

The results obtained by applying the volumetric optimization model to 500 ml, 1,000 ml and 1,500 ml bottles show that savings of up to 6.4%, 7% and 10%, respectively, can be achieved in the weight of pet bottles, keeping constant: their thickness, quality, mechanical resistance and low permeability to gases and vapors. It is concluded that the mathematical model of volumetric optimization has a high impact on the packaging industry, since it can generate considerable material savings of up to 10% and therefore reduce manufacturing costs, which also represents a reduction in environmental impact. In addition, the optimization model allows to choose the dimensions of the container, with the lowest weight, while maintaining its quality, reducing costs and being aesthetically attractive.

### **Keywords:**

Container, packaging, optimization, diameter, height, weight.

## I. INTRODUCCIÓN

El confinamiento del año 2020 debido a la pandemia en todo el mundo trajo consigo un aumento en la venta de productos por internet, en la que los envases y empaques han jugado un papel fundamental para el envío de los productos a los clientes, generando un incremento en el consumo de empaques, los cuales al ser desechados generan un alto impacto ambiental a nivel global. Actualmente, el 75 % de los productos terminados requieren envase; de éstos, el 90 % son utilizados en la industria de bebidas y alimentos, por lo que, en los últimos años, se viene impulsando el diseño y desarrollo de envases reutilizables, reciclables, optimizados y preparados para el cumplimiento de las nuevas exigencias de los clientes y de la legislación vigente (Zavaleta, 2022).

En el sector de la industria de los envases pet en el Perú, es un aspecto prioritario el uso de por lo menos 15% de material reciclado en las botellas pet, en cumplimiento de la normativa legal vigente, contribuyendo de esta manera al desarrollo sostenible mediante la reducción del impacto ambiental y la optimización de la economía de los procesos. Por tal motivo, como parte de la gestión operativa en las organizaciones, existe una gran necesidad por fabricar envases con materiales más amigables con el medio ambiente y a menor costo, siendo la tendencia en el segmento de botellas, la reducción del peso de los envases; de manera que la producción y el consumo de empaques se realice mediante una dinámica económica y sostenible, cuyos objetivos están asociados al problema de optimización (Surjet, 2021a).

La contribución del presente trabajo es realizar un planteamiento de mejora y optimización en el proceso de producción de envases en la industria de bebidas, lo cual producirá una reducción en los costos de fabricación, costos de transporte, entre otros, y primordialmente generará un impacto favorable al medio ambiente, promoviendo la conservación de los recursos mediante la reducción del peso de material en los empaques o envases durante su fabricación, los cuales son desechados al ambiente luego de ser utilizados (Wiese, 2018). El desarrollo del presente trabajo es aplicable en la fabricación de todo tipo de empaques o envases, cualquiera que sea su forma y material.

Según lo manifestado por Nisticò, R. (2020), un **problema que existe** en la industria de bebidas es que se ha observado el hecho que, durante el proceso de elaboración de bebidas, la utilización de envases de material pet genera un costo considerable por la cantidad de envases utilizados; dicho costo está asociado al peso de los envases, por lo que si se lograra reducir el peso de estos envases se lograría una reducción en los costos de fabricación. Un **problema adicional** es cuando finalmente los envases son desechados por el consumidor, generando residuos sólidos que causan un impacto negativo en el ambiente.

Por lo que, para reducir este impacto en el ambiente, se necesita optimizar el proceso de fabricación de los envases pet, mediante la reducción del peso de los mismos. Sin embargo, una reducción en el peso de los envases podría causar la reducción del espesor de las paredes del envase, perjudicando la calidad del envase, es decir, podría afectar sus propiedades de, resistencia, permeabilidad, apariencia, etc. Una de las formas de no afectar estas propiedades, es manteniendo el espesor en las paredes del envase, y aunque el sentido común haga creer que el espesor del envase se reduce al reducir el peso del envase, esto no necesariamente es así, ya que si se emplean algunas herramientas matemáticas para el análisis de las dimensiones del envase, se puede encontrar el peso óptimo de un envase que sea económico y dimensionalmente favorable, sin afectar la calidad y propiedades del envase (Esumer, 2018).

Para ello, teniendo en consideración que según Torres y Monroy (2020), para el **planteamiento del problema**, se debe reflexionar con cuestionamientos sobre los elementos que lo estructuran, entonces se puede preguntar ¿cómo se reduce el peso de un envase, sin perjudicar su calidad?; ¿cuánto es el peso de un envase que da como resultado el menor costo?; o en forma más concreta: ¿cuál es la relación óptima entre el peso y las dimensiones de las botellas pet en una planta embotelladora y cuál es su impacto en la industria de bebidas y en el medio ambiente?. Por lo tanto, adecuando estos cuestionamientos al estudio de investigación, se plantea la siguiente **problemática**:

Como **problema general**, se plantea: ¿Cuál es la relación óptima entre las Dimensiones y el Volumen de las botellas Pet, elaborados en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico?

De la misma manera, como **problemas específicos**, se plantean: Problema Específico 1: ¿Cuál es la relación diámetro/altura óptima de las botellas pet de 1500 ml, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico?; Problema Específico 2: ¿Cuál es la relación diámetro/altura óptima de las botellas pet de 1000 ml, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico?; Problema Específico 3: ¿Cuál es la relación diámetro/altura óptima de las botellas pet de 500 ml, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico?

Para responder a estas preguntas, y como parte de la justificación del estudio, es importante considerar, que se debe de fundamentar este proyecto de investigación mediante una operación racional de estos conocimientos (Sampieri, 2018), lo cual se hará bajo cinco aspectos: metodológico, práctico, teórico, social y económico:

Como **justificación metodológica**, el presente trabajo de investigación contribuirá al uso de métodos de análisis matemático aplicado a la realidad, análisis de maximización y minimización de funciones, aplicación de derivadas de una función, el uso de herramientas de optimización, todo lo cual beneficiará a los estudiantes de investigación quienes podrán tener en cuenta este trabajo, para desarrollos posteriores de nuevos trabajos de investigación.

Como **justificación práctica**, el presente trabajo de investigación contribuirá a reducir el peso de los envases pet y de otros tipos de envases y por ende reducirá también el impacto ambiental al reducir las toneladas de pet desechados al ambiente; asimismo, contribuirá a reducir los costos de fabricación de envases al utilizar menos material pet para la fabricación de cada envase, y beneficiará a las empresas quienes a la vez, podrán invertir en tecnologías modernas y contratar mano de obra especializada.

Como **justificación teórica**, el presente trabajo de investigación contribuirá al conocimiento ya existente sobre la investigación de materiales para la fabricación de envases; las ecuaciones planteadas para encontrar la cantidad mínima de material tienen un valor teórico y pueden ser usadas para el desarrollo de cualquier tipo de envase y material, incorporando conceptos como derivada de una función y análisis dimensional, lo cual podrá ser incorporado como conocimiento a la línea de investigación.

Como **justificación social**, el presente trabajo contribuirá al bienestar de las personas y de la población, al reducir el impacto ambiental al reducir la cantidad de material y envases pet eliminados al ambiente y con ello beneficiará a las personas, a la flora y a la fauna al generar menos cantidad de residuos sólidos en los hogares, en la industria, en los botaderos y en los mares.

Como **justificación económica**, el presente trabajo contribuirá a reducir el peso en la fabricación de envases pet, a reducir los costos de fabricación, a mejorar la productividad y lograr una mayor rentabilidad, y finalmente, a optimizar el proceso de fabricación de envases pet en una planta embotelladora. La reducción de 1 g en el peso de un envase o botella pet, es equivalente a un ahorro aproximado de unos 750,000 U.S.\$ al año.

La **viabilidad o factibilidad** de este trabajo de investigación se justifica en que se tienen los conocimientos, las competencias, las habilidades y los recursos de horas-hombre necesarios para la realización del análisis matemático y el procesamiento de la información (Sampieri, 2018, p. 46).

En este punto se definen los **objetivos de la investigación**, utilizando verbos con terminación en “ar”, “er” e “ir” de acuerdo a la Taxonomía de Bloom; se formulan los objetivos, tanto el general y los específicos. El objetivo general se plantea y describe sobre la pregunta de investigación o problema general, y los objetivos específicos se detallan en relación a las actividades a realizar para alcanzar el objetivo general teniendo en cuenta las dimensiones de las variables (Ñaupas et al., 2018, p. 200).

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se puede describir el objetivo general y los objetivos específicos de la siguiente manera:

Se tiene como **objetivo general**: Determinar la relación óptima entre las Dimensiones y el Volumen de las botellas Pet, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico. Asimismo, se plantean los siguientes **objetivos específicos**: Objetivo Específico 1: Determinar la relación diámetro/altura óptima de las botellas pet de 1500 ml, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico; Objetivo Específico 2: Determinar la relación diámetro/altura óptima de las botellas pet de 1000 ml, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico; Objetivo Específico 3: Determinar la relación diámetro/altura óptima de las botellas pet de 500 ml, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico.

De la misma manera, habiendo descrito la problemática y los objetivos que se quieren lograr, entonces, el siguiente paso será plantear las explicaciones del problema de investigación mediante proposiciones afirmativas en forma de hipótesis, que indican lo que se trata de probar (Sampieri, 2018). Las **hipótesis de investigación** son afirmaciones comprobables que se formulan como una probable solución al problema planteado. Las hipótesis ofrecen una posible explicación al problema o necesidad encontrada (Arias y Covinos, 2021, p. 39).

Sin embargo, de acuerdo a lo manifestado por Sampieri (2018, p. 124), la formulación o no de las hipótesis depende del planteamiento del problema y del alcance del estudio, **no siempre se deben establecer hipótesis**; y además señala que en las investigaciones de enfoque cuantitativo y alcance descriptivo o explicativo, sólo se formulan hipótesis si el estudio intenta pronosticar una cifra, un valor, un dato, un hecho; que no es el caso de la presente investigación, ya que lo que se quiere es determinar el valor (óptimo) de la relación diámetro/altura de las botellas pet, y entonces no se podría afirmar ni negar cuál es ese valor óptimo (que justamente es lo que se quiere encontrar) y por lo tanto no se podría verificar la veracidad o falsedad de la hipótesis. Por lo tanto, no se puede hacer uso del planteamiento de las hipótesis como un medio de demostración, pero sí

se puede utilizar el diseño de la investigación para contestar las preguntas de investigación (si es que no se tienen hipótesis), (Sampieri, 2018, p. 150).

El pet se procesa para diversas aplicaciones debido a sus muy buenas propiedades físicas. En la industria del envasado se utiliza para la producción de botellas de pet. El concepto de soplado es un proceso utilizado para producir objetos huecos a partir de termoplásticos. El proceso básico de moldeo por soplado tiene dos fases fundamentales. La primera fase consiste en el calentamiento de las preformas. La segunda fase consiste en la extensión mecánica de las preformas en los ejes vertical y horizontal y en la extensión mediante el presoplado y el posterior soplado de las preformas. El potencial y las ventajas de los productos de plástico pet se refieren a los bajos costes de fabricación, alta durabilidad y versatilidad de uso. Un gran número de características positivas también refleja los problemas de producción ampliamente entendidos que tienen un impacto negativo en el entorno natural, el clima y la vida y la salud humana (Kruszelnicka et al., 2018).

Se puede fundamentar primeramente que, la calidad del envase está dada principalmente por su espesor, el cual le da la resistencia al envase, por lo tanto, para mantener la calidad del envase, se debe de mantener su espesor. Entonces, poniendo en práctica el uso del análisis matemático aplicado a las dimensiones del envase, como: altura, diámetro y volumen total del envase, se encontrará una ecuación matemática que relacione el peso total del envase en función de una sola variable, que puede ser la altura o el diámetro; luego, a dicha ecuación se le aplicará el operador de derivación matemática y se encontrarán los valores de altura y diámetro para los cuales el peso es mínimo. De otra manera, se graficará la ecuación del peso, en función de una de las variables dimensionales, generando una curva que permite escoger los valores de altura y diámetro más convenientes para lograr una reducción del peso del envase.

Los envases pet para la producción de bebidas, tienen un peso que depende de su capacidad, es decir, que los pesos de los envases pueden variar desde 15 g hasta 50 g aproximadamente, para envases con capacidad desde 500 ml has 3000 ml. Asimismo, una empresa embotelladora de bebidas podría usar

alrededor de 10 millones de envases al mes, por lo que una reducción en el peso de 1 gramo en el peso de un envase, podría generar ahorros considerables, aumentando el margen de utilidad y generando mayor rentabilidad a la empresa. En una disertación doctoral desarrollada por los autores Cruz Mora et al. (2017), sostienen que es posible generar un impacto financiero empleando estrategias de innovación en la fabricación de productos plásticos como el pet, aumentando sus beneficios económicos y minimizando la contaminación ambiental.

Se seguirá una metodología científica, mediante la cual se demostrará que es posible elegir las dimensiones adecuadas para que un envase o empaque contenga la menor cantidad de material posible, teniendo en cuenta su diseño y fabricación, manteniendo sus propiedades físicas de resistencia y apariencia, sin perder sus atractivos de marketing para su venta. El desarrollo de la metodología es aplicable en la fabricación de todo tipo de empaques y envases, cualquiera que sea su forma y material.

La contribución del presente trabajo es realizar un planteamiento de mejora y optimización en el proceso de producción de empaques, lo cual producirá una reducción en los costos de fabricación, costos de transporte, entre otros, y primordialmente generará un impacto favorable al medio ambiente, promoviendo la preservación de los recursos mediante la disminución del peso de material en los empaques o envases durante su fabricación, los cuales son desechados al ambiente luego de ser utilizados.

## II. MARCO TEÓRICO

Durante la investigación de los antecedentes relacionados al tema de este estudio, se encontró que los trabajos de investigación realizados a la fecha, han investigado sobre: técnicas para el incremento de la productividad en el proceso de inyección o soplado de preformas y botellas pet; asimismo, han investigado sobre la utilización de otro tipo de materiales en reemplazo del pet, para la fabricación de envases que generen menor impacto ambiental; sin embargo, el aspecto dimensional (altura, diámetro, espesor) en relación a la optimización en la fabricación de envases, no ha sido investigado de la manera como se plantea en la presente investigación.

En referencia a los **trabajos previos** revisados respecto al tema de optimización en la elaboración o fabricación de los envases pet y su impacto en la industria y en el medio ambiente, se tiene los siguientes **antecedentes nacionales**:

Chambi (2021) en su tesis, tuvo como objetivo añadir una válvula diseñada, para optimizar el procedimiento de soplado de las botellas pet, mejorando la elongación o estiramiento del material pet durante el soplado de la botella y así lograr un estiramiento uniforme del material y como resultado botellas con pared más delgada, logrando disminuir hasta en 32.2% el material pet empleado para la fabricación de la botella. Se empleó como metodología de investigación el diseño experimental, con un enfoque cuantitativo, tipo de investigación aplicada, con nivel de investigación explicativo. La muestra fue de 500 unidades y los resultados se analizaron por medio de estadísticas y comparación. Las conclusiones fueron que al añadir la válvula de pre-soplado, se obtiene una reducción del peso de las botellas en el proceso de soplado, además de un ahorro en los costos de operación, tanto en temperatura como en aire comprimido.

La tesis descrita, ayudará a conocer que una de las formas para reducir el peso de las botellas pet, es encontrando las condiciones operativas óptimas, en este caso agregando una válvula de pre-soplado, con lo que se obtienen botellas de pared o espesor más delgado pero uniforme, sin embargo, el espesor más delgado puede perjudicar la resistencia mecánica y la calidad del envase.

Calixto (2021) en su tesis, tuvo como objetivo implementar un programa o software con la finalidad de optimizar los cortes de hojalata durante la producción de envases en la empresa industrial en el proceso de estampados metálicos. Se empleó una metodología de investigación con diseño experimental, tipo de investigación aplicada, con enfoque cuantitativo y nivel explicativo. El procedimiento realizado por el software se aplicó a una población de 148 020 láminas de hojalata, durante el proceso de producción. Se usó un tipo de muestreo aleatorio probabilístico simple, con la técnica del fichaje, junto con la ficha de registro, contando con la validación por juicio de expertos, midiendo la confiabilidad por medio del coeficiente de correlación de Pearson. Como resultado, se verificó que luego de haber implementado el software de optimización de cortes, se logró disminuir el porcentaje de merma de 2.92% a 2.52%, también, se disminuyó el costo de \$1,206 a \$1,044. Como conclusión, se tuvo que el sistema de optimización de cortes mejora la producción de los envases, aumentando también la productividad en la empresa.

En la tesis descrita se puede apreciar la optimización en los cortes de hojalata mediante la utilización de un software que realizaba una mejor distribución de diferentes cortes que tenía que hacer sobre la superficie de la plancha de hojalata, de manera que minimizaba la cantidad de residuos o merma. Este enfoque de optimización o minimización es similar al que se va a usar en este estudio.

Yugsi (2021) en su tesis, tuvo como objetivo, diseñar la tecnología para fabricar los moldes y simular el proceso de moldeo por soplado de envases PET los cuales serán verificados de acuerdo con las especificaciones que requiere la planta de embotellado de bebidas, con el fin de optimizar los parámetros de proceso, los tiempos y los costos de fabricación. Se empleó una metodología de investigación con diseño no experimental, tipo de investigación aplicada, con enfoque cuantitativo y nivel explicativo. Se diseñó la tecnología para la elaboración de moldes utilizando los softwares de ingeniería para el diseño y manufactura asistido por computador. Asimismo, con la simulación del proceso de moldeo por soplado, utilizando un software de dinámica de fluidos computacional (CFD), se determinaron las propiedades térmicas y mecánicas del molde y el

espesor para los envases. Por último, se determinaron los parámetros de optimización del proceso de moldeo por soplado, con los cuales se eliminan los defectos en los envases. Como resultado se obtuvo, para las botellas de 500 ml: presión de soplado 32 bares, tiempo de ciclo 2.5 segundos, temperatura de la preforma 95°C y velocidad de estiramiento 7.3 m/s. Como conclusión, se tuvo que los parámetros de optimización, permiten obtener un espesor de pared final de 0.30 mm en el envase mediante la simulación de distribución de espesores.

El aporte de la tesis a la presente investigación, se da al considerar algunos parámetros a tener en cuenta para llevar a cabo el soplado de las botellas pet y lograr el espesor y peso óptimos de los envases.

Argomedo (2019) en su tesis, tuvo como objetivo mejorar el diseño del sistema de válvulas de llenado independientes con el propósito de optimizar el proceso de embotellado de la línea número cinco de la planta de embotellado en la empresa Arca Continental. Se empleó la metodología con tipo de investigación aplicada con enfoque cuantitativo, nivel descriptivo, aplicando el método deductivo y con diseño pre-experimental de corte transversal, ya que se tomó como base los cálculos, procedimientos y simulaciones del diseño, que permitió establecer los efectos del sistema de válvulas de llenado independientes sobre el soplado de los envases pet. Durante la realización de este trabajo, se determinaron las fallas en el sistema de llenado, con lo cual se planteó un sistema de válvulas de llenado independientes. Así mismo, se disminuyó el tiempo para el cambio de las válvulas defectuosas, y por ende se eliminaron los tiempos de parada, se redujeron las mermas, evitando también que la bebida se contamine. Por último, se logró mejorar los indicadores de la planta de la línea cinco de Pet de la empresa. Se concluyó que con la investigación realizada se logró plantear una solución para disminuir las mermas, tiempos de parada y optimizar el cambio de válvulas defectuosas en plena producción.

El tipo de diseño de la investigación descrita en el resumen de la tesis y el procedimiento para la optimización en el proceso de envasado de botellas pet, servirá para tomar en cuenta el tipo de diseño que se debe de considerar en el presente trabajo de investigación.

Fernández y Palacios (2020) en su tesis tuvo como objetivo determinar la viabilidad de instalar una planta de producción de preformas para botellas pet (biodegradables), valorando también la condición económica, financiera y técnica. La mayor parte de las botellas son fabricadas de tereftalato de polietileno (pet), el cual es un material considerado contaminante, ya que puede demorar en degradarse, hasta 1,000 años. El presente estudio plantea que en reemplazo del pet, se utilice el ácido poliláctico (PLA) para fabricar las botellas, ya que el ácido poliláctico (PLA) proviene de residuos vegetales y se degrada en 80 días, con lo cual se optimizaría el proceso de elaboración de las botellas. La metodología de investigación empleada es de tipo de diseño no experimental, con enfoque mixto, tipo de investigación aplicada, nivel de investigación explicativo. Como conclusión, se estableció como capacidad de planta en 12,295,619 preformas/año. Con respecto a la implementación del proyecto, el proceso de producción es semejante al de las preformas pet, con una capacidad de planta de 27,144 cajas de preformas, utilizando material PLA.

La tesis descrita ayudará a conocer una de las diferentes formas de producir botellas o envases a un menor costo, con rentabilidad y generando un menor impacto ambiental por el uso de material biodegradable, lo cual ayudará a tener en cuenta para este estudio.

Dentro de los **antecedentes internacionales** respecto al tema de optimización en la elaboración o fabricación de los envases pet y su impacto en la industria y en el medio ambiente, se tiene:

Yuan et al. (2018) en su artículo de investigación publicado en la revista Annual Technical Conference, tuvo como objetivo el análisis y prueba de presión interna de botellas para llenado en caliente (BIPATH), el cual, es un programa de diseño y optimización de envases, cierres y procesos para envases que experimentan presión o vacío durante cualquier parte de la cadena de suministro. Originalmente se desarrolló para el diseño de botellas de PET de llenado en caliente. Se puede clasificar el estudio como tipo de diseño de investigación experimental, tipo de investigación aplicada, con un enfoque cuantitativo y nivel de investigación aplicativo. Se aplica a una amplia gama de tipos de envases y

sistemas de procesamiento y llenado que están sometidos a la presión/vacío y sistemas de distribución.

Los tipos de contenedores incluyen botellas y latas de plástico moldeadas por soplado por inyección/extrusión, tinas y vasos moldeados por inyección o termoformados, y latas de aluminio y acero. BIPATH calcula la presión permisible del paquete de envases, que es la presión o el vacío que el paquete puede soportar sin deformaciones o distorsiones inaceptables, y la presión residual del paquete, que es la presión o el vacío generado dentro del paquete. La relación entre la presión admisible y la presión residual es conocida como factor de seguridad de la presión del envase. El resultado es que ofrece a los proveedores de botellas y a los dueños de marcas, una forma sencilla de medir qué tan bien (o mal) se desempeñaría el envase en la etapa inicial del proceso de desarrollo del envase y del producto, ya que no se requieren botellas físicas ni muestras de productos terminados para el programa BIPATH. Como conclusión del estudio se puede indicar que la presión o el vacío se pueden gestionar y optimizar mejor utilizando BIPATH a través de cambios en el diseño del recipiente y el cierre, el contenido del producto, las condiciones del proceso (perfiles de presión, temperatura y duración) y el compromiso de vida útil.

De la investigación anterior se desprende que algunos de los parámetros que influyen en la resistencia de un envase pet, son la presión y el vacío, los cuales no deberían exceder la resistencia del envase ya que no debería de deformarse, es decir que el BIPATH ayudará a que la botella no se deforme, contraiga y disminuya su volumen (o también su diámetro y altura), lo cual será de utilidad para el análisis del presente estudio.

Hopmann & Twardowski (2018) en su artículo de investigación publicado en Annual Technical Conference - ANTEC, tuvo como objetivo, demostrar que la forma óptima del moldeo por soplado con estirado biaxial es un proceso para producir un recipiente de plástico a partir de una preforma o un parison que se estira tanto en dirección circunferencial como axial cuando la preforma se sopla en la forma de recipiente deseada. Está bien establecida para la producción a gran escala de botellas de PET de alta calidad con excelentes propiedades

mecánicas y ópticas. Se puede clasificar la investigación, como de tipo de diseño experimental, tipo de investigación aplicada, con enfoque cuantitativo y nivel de investigación aplicativo. El concepto de "prototipado virtual" está hoy en día bien establecido en la industria del moldeo por estirado y soplado para mejorar las propiedades de los envases durante la fase de diseño. Sin embargo, una optimización virtual todavía está conectada con mucho trabajo manual. Por lo tanto, se integró una simulación de proceso y una simulación de prueba para la resistencia al apilamiento en un ciclo de optimización para diseñar una geometría de preforma para mejorar las propiedades mecánicas de la botella correspondiente. Los resultados muestran que la optimización realizada con algoritmos basados en Newton conduce a propiedades mecánicas subóptimas. Como conclusión se tuvo que, las investigaciones muestran que la función objetivo que indica las propiedades mecánicas de la botella tiene varios valores máximos locales que impiden la determinación de un máximo global. Las investigaciones posteriores se centrarán en diferentes algoritmos de optimización.

La investigación anterior utiliza una simulación de prueba para la resistencia al apilamiento en un ciclo de optimización para diseñar una geometría de preforma para mejorar las propiedades mecánicas de la botella, lo que indica que en un proceso de optimización de los envases, un factor importante es la geometría del envase que incluye, el diámetro, la altura y su espesor, los cuales forman parte de las variables de este estudio.

Tan et al. (2018) realizaron una investigación del efecto del diámetro de la preforma sobre el espesor de la pared del envase pet. El objetivo del estudio fue optimizar el proceso de fabricación de las botellas pet por moldeo, estiramiento y soplado, el cual puede mejorarse minimizando el grosor de las paredes de la preforma. Se puede clasificar la investigación, como un tipo de diseño de investigación experimental, tipo de investigación aplicada, con un enfoque mixto y nivel de investigación aplicativo. Una de las principales características del proceso de fabricación que conduce a la distribución del grosor de la pared, es el diámetro inicial de la preforma. Se utilizó el programa ANSYS Polyflow para evaluar la distribución del grosor de la pared de la botella pet (para diferentes diámetros de la preforma inicial), se realizó un análisis por elementos finitos y se utilizó el

software Simple Digitizer para cuantificar los datos. Como resultado se obtuvo que, solamente el diámetro de preforma de 4 mm presentó un espesor de pared menor a 1 mm y se concluyó que el diámetro de preforma de por lo menos 6 mm puede permitir un grosor de pared de 1,3 mm, esto es, en la zona del hombro de la botella.

De la investigación anterior se desprende que para el desarrollo de la presente investigación se debe de considerar la importancia del espesor de la preforma para la fabricación de la botella, ya que de esto depende la distribución del espesor en la botella. Asimismo, se debe considerar que el moldeo por soplado y estirado biaxial es un proceso en el que las preformas se estiran tanto en dirección circunferencial como axial mientras se soplan en un molde, lo cual hace que la distribución de material sea uniforme y el espesor de la pared del envase soplado, sea también uniforme, dándole propiedades mecánicas óptimas al envase.

Luo et al. (2020) en su artículo de investigación, realizó una simulación del proceso de moldeo por inyección-estirado-soplado, utilizando un modelo visco-hiperelástico anisotrópico, en donde explica que el proceso de estirado-soplado de botellas de tereftalato de polietileno (pet) genera algunas modificaciones importantes en las propiedades mecánicas del material. El objetivo de la investigación fue utilizar simulaciones para ajustar los parámetros de operación que conduzcan a una distribución casi homogénea del espesor de la botella. El espesor homogéneo implica un estiramiento biaxial homogéneo y propiedades inducidas más uniformes para la botella final y este es un objetivo industrial importante. Se puede clasificar la investigación, como un tipo de diseño de investigación experimental, tipo de investigación aplicada, con un enfoque mixto y nivel de investigación aplicativo. Como resultado se tuvo que, teniendo en cuenta la temperatura de proceso ( $T > T_g$ ) que se suele utilizar, el material presenta una viscosidad muy alta e implica un efecto de endurecimiento por deformación asociado a la evolución de la microestructura. En una primera parte del artículo se presenta un modelo visco-plástico anisotrópico acoplado con propiedades inducidas, identificado a partir de resultados experimentales de ensayos de tracción uniaxial y biaxial. En segundo lugar, se realiza una simulación numérica

para simular el inflado libre de una preforma bajo una presión interna con diferentes parámetros. Como conclusión, se tuvo que debido a que las deformaciones finales son de hasta 300 a 400%, genera una distorsión importante de la distribución de nodos y se opta por utilizar el método de elementos naturales restringidos para la simulación numérica.

De la investigación anterior se desprende que se puede utilizar simulaciones para ajustar el mejor conjunto de parámetros que conduzca a una distribución casi homogénea del espesor a lo largo de la botella. El espesor homogéneo implica un estiramiento biaxial homogéneo y propiedades inducidas más uniformes para la botella final y este es un objetivo industrial importante y también para este estudio.

Zhang et al. (2020) en su artículo de investigación publicado en la revista *Journal of Environmental Management*, explica que una gran cantidad de botellas de tereftalato de polietileno (pet) se desechan diariamente después de su uso. Por lo tanto, el reciclaje de botellas de plástico ha suscitado una atención considerable en los últimos años. En este contexto, este estudio tiene como objetivo cuantificar los impactos ambientales y económicos de la producción de mantas a partir de botellas de plástico de desecho 100% recicladas en China a través de una evaluación del ciclo de vida junto con el método de costeo del ciclo de vida. Se puede clasificar la investigación, como un tipo de diseño de investigación no experimental, tipo de investigación aplicada, con un enfoque mixto y nivel de investigación aplicativo. Los resultados muestran que las categorías de impacto del calentamiento global y el agotamiento de los fósiles tienen una influencia significativa en el medio ambiente en general. El dióxido de carbono, el agua, el hierro, el carbón y el cromo (VI) en el agua son los principales contribuyentes a la carga ambiental general. Los costos internos y externos son \$6433/tonelada métrica y \$370/tonelada métrica, respectivamente. Los resultados del análisis indican que la optimización de los procesos de producción de productos químicos orgánicos, filamentos de poliéster reciclado y vapor puede reducir sustancialmente las cargas ambientales y económicas. Como conclusión, se tuvo que las sustituciones energéticas por gas natural y el uso de energía solar fotovoltaica en la producción de vapor y generación de electricidad son medidas

efectivas para disminuir los impactos ambientales. Finalmente, se proponen sugerencias basadas en los resultados de la investigación y el estado actual del reciclaje de botellas de plástico de desecho en China.

De la investigación anterior se desprende que se pueden obtener grandes beneficios económicos al implementar y gestionar el proceso de reciclaje de las botellas pet en la industria, por lo que se puede considerar que este enfoque puede ayudar a la implementación del presente trabajo de investigación.

Respecto a las **teorías y los enfoques conceptuales relacionados al trabajo de investigación**, se tienen los siguientes:

La teoría matemática de la aplicación de la derivada para resolver problemas de **optimización**, tiene muchas aplicaciones, sin embargo, no está muy difundida, tal vez, porque existe una creencia de que estos conceptos matemáticos sólo se ven en la universidad y no tienen mucha aplicación en la realidad. Sin embargo, esto no es así; basta sólo revisar algunos de los problemas matemáticos que se presentan en algunos libros, para darnos cuenta de la gran oportunidad de aplicar las matemáticas al mundo real y práctico (Rachelli & Christo, 2021).

La **Optimización** es un procedimiento que necesita destreza y práctica para modelar y resolver problemas de la realidad; el autor Carvalho (2019), resuelve algunos problemas prácticos de aplicación de la derivada a la realidad, haciendo previamente la siguiente presentación:

En la vida, con cierta frecuencia, se afronta el problema de descubrir la mejor forma de hacer algo. Por ejemplo, un campesino necesita decidir cuáles son los cultivos que sean más convenientes para producir la mayor ganancia. Un médico desea encontrar la dosis menor de una droga que remediará cierta enfermedad. Un fabricante quiere minimizar el costo de distribución de sus productos. Algunas veces, un problema de este tipo puede proponerse de modo que maximice o minimice una función en un determinado conjunto. En estos casos, los métodos de cálculo diferencial e integral brindan una herramienta poderosa para resolver el problema, para

lo cual se debe abordar los problemas a través de técnicas de modelado y optimización utilizando el concepto de derivada y las reglas de derivación (p. 10).

La **optimización** de los procesos en las empresas se conoce como Business Process Reengineering (BRP) o reingeniería de procesos de negocio. La BPR es una filosofía de mejora continua de los procesos que involucra a toda la organización. Incluye diferentes puntos de vista, tales como organizativa, operativa, ética, de la gestión de procesos. Se presentan diferentes opciones de mejora de los procesos. Por ejemplo, en la industria del automóvil, el ciclo de suministro entre el pedido de un cliente y la entrega del coche es de aproximadamente 60 días. El montaje del coche en sí mismo supone sólo 2 de esos días. Esto significa que los procesos de valor añadido suponen menos del 5% del ciclo total de suministro. El 95% son actividades de planificación y coordinación. En estas actividades se puede encontrar un gran potencial de optimización (Ivanov et al., 2019, p. 50).

Determinar la cantidad óptima de pedido para algunos artículos comprados es un problema típico de optimización. Esta optimización se basa en la reducción de los costes de pedido y de mantenimiento de del inventario y, en ese caso, la cantidad de pedido calculada es óptima sólo para el departamento de compras. Al mismo tiempo, este problema está estrechamente interconectado con la planificación del transporte y la mejora del nivel de servicio al cliente. Por tanto, la situación real del problema que existe es optimización integrada de inventarios (Ivanov et al., 2019, p. 51).

Según Los problemas de aplicación de la toma de decisiones basada en la optimización están interrelacionados con la complejidad, la incertidumbre y los objetivos múltiples. Una característica particular de las decisiones óptimas es la toma de decisiones multiobjetivo por parte de gestores con sus propias preferencias que, a su vez, son siempre cambiantes. De ahí que resulte imposible construir cualquier función de selección general para la toma de decisiones con

múltiples criterios. Encontrar soluciones óptimas es posible, pero puede llevar mucho tiempo.

En cuanto a los **métodos de optimización** a utilizar se puede mencionar la programación lineal, que de acuerdo a los autores Vásquez et al. (2015), tiene la siguiente definición y beneficios:

**La programación lineal (o PL)** se refiere a varias técnicas matemáticas utilizadas para asignar, en forma óptima, los recursos limitados a distintas demandas que compiten por ellos. La PL es el más popular de los enfoques que caben dentro del título general de técnicas matemáticas para la optimización y se ha aplicado a muchos problemas de la administración de operaciones.

La programación lineal tiene una gran aceptación y es aplicada en muchas industrias debido a la disponibilidad de información detallada de las operaciones y el interés por optimizar los procesos y por ende reducir los costos. Muchos proveedores de software ofrecen opciones de optimización que se usan con los sistemas de planeación de recursos de las empresas. Algunas compañías los llaman *opción de planeación avanzada, planeación sincronizada y optimización de procesos*. (p. 37)

El objetivo de la programación lineal es calcular el valor de las variables de una función que maximizan o minimizan esta. Para ello se parte de un conjunto de ecuaciones o inecuaciones, (restricciones), que limitan los valores que puede tener cada variable. Una herramienta muy utilizada para resolver los problemas de programación lineal es, por ejemplo, Solver de Excel.

Teniendo en cuenta que la realidad es difícil de copiar en forma exacta y que la simplificación y la representación son difíciles de lograr en la práctica, se tienen también los **modelos matemáticos de optimización**, en los cuales se hace una representación simplificada de una parte de la realidad utilizando el concepto de modelización. Existen modelos lógicos, a escala y matemáticos.

La **modelización** es el proceso de representación de un modelo que incluye su construcción y funcionamiento. Este modelo es similar a un sistema

real, lo que ayuda al analista a predecir el efecto de los cambios en el sistema. En otras palabras, modelar es crear un modelo que represente un sistema incluyendo sus propiedades. Es un acto de construcción de un modelo (Surjet, 2021b).

El proceso de **modelización incluye los siguientes pasos:**

**Paso 1** - Examinar el problema. En esta etapa hay que entender el problema y elegir su clasificación en función del mismo, como determinista o estocástico.

**Paso 2** - Diseñar un modelo. En esta etapa, se tiene que realizar las siguientes tareas sencillas que nos ayudan a diseñar un modelo:

- Recoger datos según el comportamiento del sistema y los requisitos futuros.
- Analizar las características del sistema, sus supuestos y las acciones necesarias para que el modelo tenga éxito.
- Determinar los nombres de las variables, las funciones, sus unidades, las relaciones y sus aplicaciones utilizadas en el modelo.
- Resolver el modelo con una técnica adecuada y comprobar el resultado con métodos de verificación. A continuación, valide el resultado.
- Preparar un informe que incluya los resultados, las interpretaciones, la conclusión y las sugerencias.

**Paso 3** - Proporcionar recomendaciones después de completar todo el proceso relacionado con el modelo. Incluye la inversión, los recursos, los algoritmos, las técnicas, etc.

Adicionalmente, en el modelado matemático, se traduce ese análisis al lenguaje de las matemáticas; la aplicación de un modelo con el objetivo de derivar estrategias que ayudan a resolver un problema o responder a una pregunta relacionada con un fenómeno determinado, se denomina simulación. La **simulación** es una herramienta muy potente para la evaluación y el análisis de los sistemas nuevos y los ya existentes. Permite anticiparse al proceso real, validarlo y obtener su mejor configuración (Jacobs & Chase, 2018). La **simulación** de un sistema es la operación de un modelo en términos de tiempo o espacio, que ayuda a analizar el rendimiento de un sistema existente o propuesto. En otras palabras, la simulación es el proceso de utilizar un modelo para estudiar el rendimiento de un sistema. Es el acto de utilizar un modelo para la simulación.

Según Heizer et al. (2007), la **simulación** es la tentativa de reproducir los atributos, apariencia y características de un sistema real. Se trata de cómo simular parte de un sistema de dirección de operaciones elaborando un modelo matemático que represente tanto como sea posible al sistema en cuestión. El modelo se utilizará, a continuación, para evaluar los efectos de diferentes acciones. Son tres las ideas sobre la que se basa la simulación:

1. Imitar, con una representación matemática, una situación del mundo real.
2. A continuación, estudiar sus propiedades y características operativas.
3. Finalmente, sacar conclusiones y tomar decisiones de acción basadas en los resultados de la simulación.

Las **ventajas** de utilizar la **modelización y la simulación** son las siguientes:

1. Fácil de entender - Permite comprender cómo funciona realmente el sistema sin trabajar en sistemas en tiempo real.
2. Fácil de probar - Permite realizar cambios en el sistema y su efecto en la salida sin trabajar en sistemas en tiempo real.
3. Fácil de actualizar - Permite determinar los requisitos del sistema aplicando diferentes configuraciones.
4. Facilidad para identificar restricciones - Permite realizar un análisis de los cuellos de botella que provocan retrasos en el proceso de trabajo, la información, etc.
5. Facilidad para diagnosticar problemas - Algunos sistemas son tan complejos que no es fácil entender su interacción en un momento dado. Sin embargo, la modelización y la simulación permiten comprender todas las interacciones y analizar su efecto. Además, se pueden explorar nuevas políticas, operaciones y procedimientos sin afectar al sistema real.

La **modelización y la simulación** pueden aplicarse a los siguientes ámbitos: aplicaciones militares, formación y asistencia, diseño de semiconductores, telecomunicaciones, diseños y presentaciones de ingeniería civil y modelos de comercio electrónico. Además, se utiliza para estudiar la estructura interna de un sistema complejo como el biológico. Se utiliza al optimizar el diseño de sistemas como el algoritmo de enrutamiento, la línea de montaje, etc.

Se utiliza para probar nuevos diseños y políticas. Se utiliza para verificar soluciones analíticas.

Uno de los verdaderos problemas a los que se enfrenta el analista de simulación es la validación del modelo. El modelo de simulación sólo es válido si el modelo es una representación exacta del sistema real, de lo contrario no es válido. La validación y la verificación son los dos pasos de cualquier proyecto de simulación para validar un modelo.

La **validación** es el proceso de comparar dos resultados. En este proceso, hay que comparar la representación de un modelo conceptual con el sistema real. Si la comparación es verdadera, entonces es válido, si no, no es válido.

La **verificación** es el proceso de comparación de dos o más resultados para garantizar su exactitud. En este proceso, se tiene que comparar la implementación del modelo y sus datos asociados con la descripción conceptual y las especificaciones del desarrollador.

### III. METODOLOGÍA

#### 3.1. Tipo y diseño de investigación

En esta etapa se realizaron las consultas y se tomaron algunas de las primeras decisiones en el proceso metodológico, mediante la selección del tipo de investigación y el enfoque seguido de la misma. Esto, desde luego, considerando que debe ser congruente y estar de acuerdo con el área, ciencia o campo en que se identifica el problema, con el objetivo, las aptitudes del investigador y sus disponibilidades en cuanto el acceso a los datos. Entonces, se tuvo que precisar, si se opta por una investigación experimental, descriptiva, etc., y si, acorde con esto, se determina si el enfoque de la investigación es cualitativo o cuantitativo (Niño, 2019, p. 53).

**Tipo de investigación:** El tipo de investigación utilizado en el desarrollo del presente trabajo es el tipo de investigación Aplicada, ya que resuelve un problema específico, desarrolla una aplicación práctica, y aplica de forma práctica conocimientos y teorías. El tipo de investigación Aplicada obedece a una clasificación según su finalidad, este tipo de investigación toma como base la teoría de la investigación básica y con ella resolver problemas prácticos, normalmente se usan en medicina y en ingeniería (Arias y Covinos, 2021, p. 68).

**Enfoque de la investigación:** En el presente trabajo de investigación se utilizó el enfoque Cuantitativo. Los enfoques son las rutas a seguir para resolver el problema de investigación; el enfoque cuantitativo se caracteriza por utilizar planteamientos específicos, orientado a medir las variables, uso de datos numéricos, sigue un proceso secuencial y deductivo (Sampieri, 2018, pp. 105, 106).

**Alcance o nivel de investigación:** En el presente trabajo de investigación se utilizó el nivel de investigación Descriptivo-Explicativo. Según Sampieri (2018), los estudios descriptivos nos dan información para realizar estudios explicativos; su finalidad es describir características y propiedades de fenómenos, hechos, conceptos, variables, personas u objetos sujetos a un análisis (pp. 106, 108).

**Diseño de investigación:** es la estrategia planeada para conseguir la información que se desea con la finalidad de responder el problema planteado en la investigación (Sampieri, 2018, p. 150). En el presente trabajo de investigación se utilizó el diseño de investigación No Experimental de corte transversal. Por ser el tipo de diseño No Experimental, la investigación se basará en los cálculos, procedimientos y simulaciones y en la realización del diseño se responderán las preguntas de investigación planteadas. En caso se quiera comprobar en una situación real, entonces se podrá valer del experimento que, en este caso, consiste en someter a las botellas pet (en estudio) a la variación de sus dimensiones y determinar bajo condiciones controladas y conocidas, cuál es la influencia de estas variaciones sobre el peso de las botellas pet.

### **3.2. Variables y operacionalización**

Antes de definir las variables del presente estudio, es conveniente precisar algunos conceptos relacionados que se van a utilizar. Para ello se va a citar las definiciones dadas por el autor Niño (2019):

En su significado más general, el término variable se utiliza para designar cualquier característica de la realidad que pueda ser determinada por observación y que pueda mostrar diferentes valores de una unidad de observación a otra. Dicho de otra manera, se entiende por variable cada una de las características o propiedades del objeto estudiado en una investigación, las cuales pueden tomar diferentes valores.

Asimismo, se puede definir los tipos de variable según su asociación entre ellas como:

Variable independiente: es aquella que determina el valor de la variable dependiente. Esto, en un modelo o estudio estadístico. Otra forma de definir la variable independiente, también llamada explicativa, es aquella cuya variación también causa un cambio en la variable dependiente o variable explicada.

Variable dependiente: es aquella que, dentro de un modelo económico o estadístico, es explicada por otras variables a las que se denominan

independientes. La variable dependiente, en otras palabras, es aquella cuya variación en su valor viene motivada por fluctuaciones en las variables independientes.

Con estos conceptos se definen a continuación las variables para el presente trabajo de investigación:

**Variable Independiente** = Dimensiones de la botella (Altura, Diámetro, Espesor)

**Definición conceptual:** Las dimensiones físicas de una cosa u objeto da a entender el concepto de tamaño del objeto, el cual es muy utilizado en este idioma para referirse a las medidas, dimensiones físicas de una cosa u objeto, tal es el caso de una botella, o de cualquier otro tipo de envase, entre otros. Entre esas medidas se cuentan la altura, el largo, el ancho, su volumen y la superficie. La altura o también denominada alto dimensional, de un objeto o figura es una longitud o una distancia de una dimensión geométrica, usualmente vertical o en dirección hacia la gravedad. El diámetro es la longitud que posee el círculo si se traza un segmento de un punto a otro punto de la circunferencia pasando siempre por el centro. El espesor o también denominada ancho dimensional, de un objeto o figura es una longitud o una distancia de una dimensión geométrica (Santamaría, 2019).

**Definición Operacional:** La medición de las dimensiones del envase se realizará de la siguiente manera: para la **Altura**, se utilizará un instrumento de medición llamado “medidor de altura” o “calibrador de altura” con unidades en centímetros, con una escala de 0 cm a 30 cm y precisión de +/- 0.01 cm, en el cual se colocará el envase o la botella y por comparación mediante la indicación de las unidades del instrumento se tomará el valor de la medida de la Altura. Para el **Diámetro**, se utilizará un instrumento de medición digital llamado “pie de rey” con unidades en centímetros, con una escala de 0 cm a 15 cm y precisión de +/- 0.01 cm, en el cual se colocará el envase o la botella y por comparación mediante la indicación de las unidades del instrumento se tomará el valor de la medida del Diámetro. Para el **Espesor**, se utilizará un instrumento de medición digital llamado “equipo de medición de espesor de pared de Envases”, marca OLYMPUS, modelo Magna-Mike 8600 con unidades en milímetros, con una escala de 0 mm a 2 mm y

precisión de +/- 0.01 mm, en el cual se colocará una esfera magnética pequeña dentro de la botella y ésta sobre el vástago magnético y por comparación mediante la indicación de las unidades del instrumento se tomará el valor de la medida del Espesor. La toma de muestras se hará aplicando la fórmula para muestras finitas, en la que se ingresará con la cantidad del lote de producción de las botellas y se seleccionará la cantidad de botellas a muestrear, luego, ésta cantidad se dividirá en una serie o frecuencia de tiempo randomizada para la toma de las muestras cada cierto tiempo hasta completar la cantidad a muestrear. Finalmente, se anotarán todos los resultados para su posterior análisis gráfico y estadístico en Excel y utilizando el paquete estadístico SPSS con el que se hallará el grado de significancia de las variables.

**Variable Dependiente = Volumen (de la botella)**

**Definición conceptual:** en cuanto al **Volumen**, es una magnitud de tipo escalar, definida como la extensión de las tres dimensiones de un objeto, siendo estas tres dimensiones, su longitud, ancho y altura. En otras palabras, el volumen es la medida del espacio que ocupan los cuerpos físicos, el cual varía según sus proporciones. El volumen puede tomar diversas formas, dependiendo de los estados de la materia (sólido, líquido, gaseoso y plasmático) y también de su temperatura. Así, los sólidos tienen un volumen fijo y determinado, mientras que los líquidos y gases adaptan la forma del recipiente que los contiene. El volumen de los sólidos, líquidos y gases cambian, debido a variaciones de temperatura (Coluccio, 2021).

**Definición Operacional:** el volumen de un objeto se calcula multiplicando su longitud por su ancho y por su altura. En el caso de sólidos geométricos se pueden aplicar algunas fórmulas, como por ejemplo:

- **Volumen de un paralelepípedo.**  $v = l \times b \times h$ , donde  $l$  es longitud,  $b$  es ancho y  $h$  es altura.
- **Volumen de un cubo.**  $v = a^3$ , donde  $a$  es el lado del cubo, o  $a \times a \times a$ .
- **Volumen de una esfera.**  $v = 4/3 \times \pi \times r^3$ , donde  $r$  es el radio.
- **Volumen de un cilindro.**  $v = \pi \times r^2 \times h$ , donde  $h$  es la altura del cilindro y  $\pi \times r^2$  es la superficie de la base circular.

Para medir el volumen se ha establecido en el Sistema Internacional (SI) la unidad de medida metro cúbico (m<sup>3</sup>), sin embargo, para medir la capacidad (o volumen en presencia de fluidos) se emplean la unidad litros o mililitros.

### Otros conceptos básicos

La **Densidad** está definida como la cantidad de masa de un cuerpo u objeto, dividida por el volumen que ocupa. Es una magnitud escalar. Se la representa regularmente con la letra griega rho ( $\rho$ ) y su fórmula matemática es  $\rho = m / V$ . Según el Sistema Internacional (SI), la unidad de medición de la densidad es el kilogramo sobre metro cúbico (kg/m<sup>3</sup>), pero para esta investigación se usará el gramo sobre centímetro cúbico (g/cm<sup>3</sup>). Una de las propiedades de la densidad es que varía en mayor o menor medida con la presión y con la temperatura; así como también, con los cambios de estado de la materia. En general, los gases tienen menor densidad que los líquidos y los líquidos tienen menor densidad que los sólidos; esto es, debido a la poca cohesión entre sus partículas (Ondarse, 2021).

En cuanto al **Peso**, éste se puede definir de la siguiente manera “Este concepto puede ser definido como la fuerza con la que el planeta Tierra atrae a los cuerpos. El peso de un determinado cuerpo se calcula como la multiplicación de su masa y la aceleración de la gravedad.” (Santamaría, 2019). Si bien es cierto, la medición del **Peso** del envase se puede realizar utilizando una balanza de precisión con unidades en gramos, con una escala de 0 g a 60 g y con una precisión de +/- 0.001 g, en el cual se colocará el envase o la botella y por comparación mediante la indicación de las unidades del instrumento se tomará el valor de la medida del Peso; en este caso el Peso se calculará multiplicando la densidad del material pet por el volumen de material de la botella.

Asimismo, el **Costo** de la botella se evaluará, teniendo en cuenta el costo unitario del material pet en función del peso de la preforma que se utiliza para elaborar la botella pet. Asimismo, se desarrollará una ecuación matemática utilizando la geometría de la botella o envase en función de su altura, diámetro, espesor, capacidad y peso.

En cuanto al **Impacto ambiental** (huella plástica) se puede decir lo siguiente “Se estima que sólo el 7% de los casi 8.300 millones de toneladas de plástico virgen producido entre 1950 y 2015 ha sido reciclado, mientras que más de la mitad - aproximadamente 4.900 millones de toneladas métricas ha terminado en vertederos o en la naturaleza. Se podría decir que esa es la huella plástica de la humanidad en su conjunto. Una huella que todos (personas, instituciones, empresa) dejan en mayor o menor medida. La huella plástica se puede definir como la cantidad de plástico que acaba como residuo en la naturaleza” (Residuos Profesional, 2020).

Para obtener los valores de la Huella Plástica, primero se determinará, la cantidad en peso que se puede ahorrar en material pet por cada botella y luego con este valor se calculará la cantidad de plástico que acaba como residuo en la naturaleza, o lo que es lo mismo, la huella plástica.

Según el autor Bauce et al. (2018), define la operacionalización de variables de la siguiente manera:

Es un proceso mediante el cual la variable se transforma de un nivel abstracto a un nivel empírico, observable, medible. Ejemplo: La variable “edad”, su referente empírico (indicador) es directamente observable y medible: años de edad. Algunas variables hay necesidad de desglosarlas en otras subvariables o dimensiones. Los indicadores pueden ser utilizados para ser establecidos en términos de cantidad o cualidad del atributo o característica que representen, expresando la respectiva unidad de medida o expresión matemática para calcularlo. (p. 103)

Para este trabajo de investigación, la Operacionalización de las variables comprende cuatro pasos: 1) Definición de la variables teóricas o abstractas; 2) Identificación de las dimensiones; 3) Identificación de los indicadores; 4) Determinación de los ítems y las escalas para cada uno de los indicadores.

Teniendo en cuenta las definiciones y consideraciones anteriores, se van a definir y operacionalizar cada una de las variables.

### 3.3. Población (criterios de selección), muestra, muestreo, unidades de análisis

Los autores Ñaupas et al. (2018) definen estos conceptos muy acertadamente, de la siguiente manera:

La **población** está definida como el total de las **unidades de estudio**, que contienen las características requeridas, para ser consideradas como tales. Estas unidades pueden ser personas, objetos, conglomerados, hechos o fenómenos, que presentan las características requeridas para la investigación.

La **muestra** está definida como una porción de la población que tiene las características necesarias para la investigación y que por lo tanto debe ser representativa de la población, para poder generalizar los resultados de la muestra a la población. El **tamaño de la muestra** es aconsejable determinarla a través de la fórmula para muestras finitas. También se puede emplear paquetes computarizados o fórmulas estadísticas.

El **muestreo** es un procedimiento que permite la selección de las **unidades de estudio** que van a conformar la muestra, con la finalidad de recoger los datos requeridos por la investigación que se desea realizar. El muestreo como tal, comprende en primer lugar una serie de etapas que necesariamente se deben respetar para garantizar la confianza y no sesgar el trabajo con una muestra. En segundo lugar, los tipos de muestreo que se pueden utilizar en función a la exigencia de la naturaleza de la investigación. (p. 334-336)

La **unidad de muestreo** es el tipo de caso que se selecciona para estudiar y con frecuencia es idéntica a la **unidad de análisis** que es de donde se obtendrá la información que se quiere investigar; se determina mediante la pregunta sobre qué o quién se recolectarán los datos o qué o quién va a ser medido, por lo que debe ser consistente con las preguntas y con los objetivos de la investigación (Sampieri, 2018, p. 197).

Para este estudio se definió lo siguiente: la **población** la constituyen los Lotes de producción de envases o botellas pet producidas en una planta embotelladora y la **muestra** será del tipo probabilística o aleatoria, representativa de la población. Asimismo, el **muestreo** será en forma estratificada, y el **tamaño de la muestra** se determinará mediante el uso de las fórmulas estadísticas para muestras finitas; para lo cual se va a considerar un Nivel de confianza = 95.5%; Probabilidad de éxito o fracaso = 50% y Nivel de error = 5%.

### **3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Los datos e información serán obtenidos por medio de la técnica de observación y documentación. El medio, herramienta o instrumento a utilizar serán los algoritmos de cálculo del volumen de sólidos y un modelo de optimización volumétrico.

### **3.5. Procedimientos**

Luego de determinar las variables, sus dimensiones, métricas, y el establecimiento de las técnicas e instrumentos a usar como son la observación y la documentación (como técnicas) y la ficha bibliográfica y de registro de observación (como instrumentos), se procederá a la deducción de la relación matemática entre las dimensiones de un envase, que para este caso se elegirá un cilindro simple donde se tendrá su diámetro, su altura y su espesor. Con esta información se encontrará una ecuación que relacione estas dimensiones y luego se hallará el valor mínimo del volumen de material con el que se obtendrá también el menor costo de la botella (Arias, 2020).

La Idea se fundamenta en una propiedad muy conocida de los líquidos, cual es que: "Todo cuerpo líquido adopta la forma del recipiente que lo contiene". Así por ejemplo 1 litro de bebida puede estar contenido en un recipiente de forma: Esferoidal, cilíndrica, cúbica, cónica, etc., o cualquier combinación de ellas, adoptando la forma del recipiente y teniendo siempre su misma capacidad o volumen de 1 litro. El peso de un envase depende de la cantidad de material utilizado en su fabricación; la cantidad de material utilizado, depende del tamaño y del espesor del envase. Si se quiere ahorrar material en la fabricación de un envase de una Capacidad o Volumen determinado, manteniendo el espesor del

mismo, entonces, la única forma de hacerlo es variando sus demás dimensiones (altura y diámetro), aunque para el sentido común, esto, aparentemente no es posible.

El peso de los envases depende de su forma y de su espesor y su cálculo es relativamente engorroso, por lo tanto, para simplificar y con fines ilustrativos el cálculo se hace para un envase de forma cilíndrica desde la base, más un tramo cónico hasta el nivel de llenado. Análogamente se deduce para cualquier otra forma de envase.

### **3.6. Método de análisis de datos**

El análisis de los datos se realizará utilizando primeramente el cálculo del volumen de material pet que forma parte de la botella. Para ello se elegirá primero un modelo y capacidad de envase que será de un cilindro o una botella lisa con un espesor de pared y capacidad determinados. Luego se determinará el volumen del envase utilizando para ello las fórmulas de volumen en función del diámetro y de la altura, con lo cual se obtendrá una primera ecuación; asimismo, considerando el espesor dentro de la primera ecuación, se encontrará la ecuación de la cantidad de material pet (en volumen) correspondiente al envase. Finalmente si se multiplica el volumen de material obtenido en la ecuación anterior, por la densidad del material pet, se encontrará la ecuación del peso de la botella en función del diámetro de la botella (o de su altura).

La ecuación final anterior se puede derivar y se obtendrán los valores del diámetro (o de la altura) que hacen que el peso sea el mínimo. Se usará el Excel para realizar una gráfica de la ecuación obtenida y se graficarán los valores mínimos. Luego, la información se copiará al software AutoCad para realizar una simulación del envase o botella con el que se hallará también los valores del diámetro y de la altura que hacen que el peso del envase sea el mínimo. Finalmente, si se obtuvieran datos diámetro, altura, espesor y peso de botellas pet de una planta de embotellado, entonces se utilizará como prueba de hipótesis, la prueba de medias.

### **3.7. Aspectos éticos**

El desarrollo y publicación de este trabajo de investigación se realizará en estricto cumplimiento de la normativa conforme al Código de Ética en Investigación de la Universidad César Vallejo, y cuyo cumplimiento por el investigador se hará respetando la autoría de las fuentes citadas las cuales serán utilizadas como apoyo del presente trabajo. Asimismo, todas las referencias serán colocadas al final del trabajo de investigación, en las referencias bibliográficas, en cumplimiento de la transparencia y de los procedimientos y normas éticas para la investigación motivo del presente trabajo.

## IV. RESULTADOS

### Modelo de Optimización Volumétrico

Para la determinación del modelo de optimización volumétrico se tuvo en cuenta primeramente que la calidad del envase o botella depende directamente de su espesor, el cual le da la resistencia al envase, por lo tanto, para mantener la calidad del envase, se mantuvo su espesor constante para una misma capacidad del envase. Luego, aplicando las relaciones entre altura, diámetro y espesor para una determinada capacidad del envase, se encontró una ecuación matemática para el volumen de material del envase, en función a la altura, diámetro, espesor y capacidad del envase, aplicando la inferencia matemática.

Siendo el espesor y la capacidad del envase constantes y poniendo la altura del envase en función del diámetro, se encontró la ecuación final para el volumen de material del envase en función de una sola variable que es el diámetro. Finalmente, se multiplicó el volumen de material del envase por la densidad del material pet, teniendo como resultado el peso del envase; a continuación, se multiplicó también el peso del envase por el costo unitario del mismo y por diferencia se obtuvo el monto ahorrado por envase y el monto ahorrado total.

Teniendo la ecuación matemática que relaciona el volumen o la cantidad (peso) de material del envase en función de una sola variable que es el diámetro, entonces, a dicha ecuación se le aplicó el operador de derivación matemática y se encontraron los valores de altura y diámetro para los cuales el volumen de material del envase y por lo tanto, el peso del envase, son mínimos. De otra manera, se graficó la ecuación del volumen de material y del peso del envase, en función de una de las variables dimensionales, generando una curva que permite escoger los valores de altura y diámetro más convenientes para lograr una reducción del volumen de material o peso del envase, hasta su mínimo.

El peso de los envases depende de su forma y de su espesor y su cálculo es relativamente engorroso, por lo tanto, para simplificar y con fines ilustrativos el cálculo se hace para un envase de forma cilíndrica desde la base. Análogamente se deduce para cualquier otra forma de envase.

Para llevar a cabo este propósito, se planteó y desarrolló el presente modelo de optimización volumétrico, el cual permite obtener la relación diámetro/altura óptimas para una determinada capacidad de los envases o de las botellas Pet. Este modelo consistió en desarrollar una ecuación matemática para calcular el peso de un envase vacío, en función de su diámetro, su altura y su espesor, para una capacidad determinada del envase. Los resultados, se muestran a continuación.

El Algoritmo de cálculo que se siguió fue el siguiente:

Previamente se definen algunos términos:

Tipo de Envase: Cilíndrico

Capacidad del envase = C

Diámetro del envase = D

Altura del envase = h

Espesor del envase = e

Área lateral del envase =  $A_L$

Área de las tapas del envase =  $A_{tapas}$

Área total del envase =  $A_{Total}$

Volumen de material del envase =  $V_{mat}$

Densidad del material del envase =  $\rho$

Peso de material del envase =  $W_{mat}$

Se calcula el Área Lateral del envase:

$$A_L = \pi Dh \quad \dots\dots\dots (1)$$

Se calcula el Área de las tapas del envase:

$$A_{tapas} = \frac{\pi D^2}{2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Se calcula el Área total del envase:

$$A_{Total} = \pi Dh + \frac{\pi D^2}{2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

Se calcula el Volumen de material del envase:

$$V_{mat} = eA_{Total} = e(\pi Dh + \frac{\pi D^2}{2}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

Si C es la capacidad del envase, entonces:

$$C = \pi r^2 h = \frac{\pi D^2}{4} h \quad \dots\dots\dots (5)$$

De donde:

$$h = \frac{4C}{\pi D^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

Reemplazando la ecuación (6) en la ecuación (4):

$$V_{mat} = e\left(\frac{4C}{D} + \frac{\pi D^2}{2}\right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

La ecuación (7) da como resultado la cantidad o volumen de material del envase, que es la que se quiere optimizar. Siendo el espesor e y la capacidad del envase C, constantes, entonces el volumen de material  $V_{mat}$  está dado en función sólo del diámetro del envase D, por lo tanto, se puede aplicar la derivada de  $V_{mat}$  respecto del diámetro D. Así:

$$\frac{dV_{mat}}{dD} = e\left(\frac{-4C}{D^2} + \pi D\right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

Para encontrar el valor del diámetro D que hace que la función  $V_{mat}$  sea mínima, se obtiene igualando la ecuación (8) a cero, de donde:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4C}{\pi}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

Donde C es la capacidad del envase, que para este caso se ha elegido los valores de C = 1,500; 1,000 y 500 ml. Reemplazando en la ecuación (9) se obtienen los valores de diámetro D = 12.4; 10.8; 8.6 cm, para los cuales el volumen y por lo tanto el peso de material del envase son mínimos. Asimismo, a estos valores de diámetro le corresponden los siguientes valores de altura h = 12.4; 10.8; 8.6 cm, con lo que la relación diámetro/altura óptima es 1 en los tres casos.

## Resultados del Objetivo Específico 1

El modelo de optimización volumétrico propuesto contempla dentro de sus restricciones, el volumen; en este sentido y de acuerdo a lo que pretende el objetivo específico 1: “Determinar la relación diámetro/altura óptima de un envase de 1500 ml, aplicando un modelo de optimización volumétrico”, se realizó el modelamiento con el volumen 1500 ml.

**Tabla 1.** *Variación del Peso del envase y Ahorro de material vs Diámetro y Altura de Envases de 1500 ml*

N°	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área Total (cm <sup>2</sup> )	Volumen de Material (cm <sup>3</sup> )	Peso del Envase (g)	Peso Ahorrado (g) / Envase	Peso Ahorrado (kg) / Mes	Ahorro Equivalente en Envases / Mes	Costo Ahorrado (US\$/mes)	Costo Ahorrado (US\$/año)
1	7.0	39.0	934.1	28.0	39.1	-5.4	-5,359	-158,979	-14,838	-178,056
2	7.5	34.0	888.4	26.7	37.2	-3.4	-3,445	-102,210	-9,540	-114,475
3	8.0	29.8	850.5	25.5	35.6	-1.9	-1,863	-55,278	-5,159	-61,911
4	8.5	26.4	819.4	24.6	34.3	-0.6	-560	-16,618	-1,551	-18,613
5	9.0	23.6	793.9	23.8	33.2	0.5	505	14,985	1,399	16,783
6	9.5	21.2	773.3	23.2	32.3	1.4	1,365	40,491	3,779	45,350
7	10.0	19.1	757.1	22.7	31.7	2.0	2,045	60,670	5,663	67,950
8	10.5	17.3	744.6	22.3	31.1	2.6	2,566	76,143	7,107	85,280
9	11.0	15.8	735.5	22.1	30.8	2.9	2,947	87,419	8,159	97,909
10	11.5	14.4	729.5	21.9	30.5	3.2	3,199	94,917	8,859	106,308
11	12.0	13.3	726.2	21.8	30.4	3.3	3,337	98,990	9,239	110,869
12	12.5	12.2	725.4	21.8	30.3	3.4	3,368	99,930	9,327	111,922
13	13.0	11.3	727.0	21.8	30.4	3.3	3,303	97,987	9,145	109,745
14	13.5	10.5	730.7	21.9	30.6	3.1	3,147	93,373	8,715	104,577
15	14.0	9.7	736.4	22.1	30.8	2.9	2,908	86,269	8,052	96,621
16	14.5	9.1	744.1	22.3	31.1	2.6	2,590	76,833	7,171	86,052
17	15.0	8.5	753.4	22.6	31.5	2.2	2,198	65,199	6,085	73,023
18	15.5	7.9	764.5	22.9	32.0	1.7	1,735	51,487	4,805	57,666
19	16.0	7.5	777.1	23.3	32.5	1.2	1,207	35,801	3,341	40,097
20	16.5	7.0	791.3	23.7	33.1	0.6	614	18,230	1,701	20,417
21	17.0	6.6	806.9	24.2	33.7	0.0	-39	-1,145	-107	-1,283
22	17.5	6.2	823.9	24.7	34.5	-0.8	-750	-22,253	-2,077	-24,923
23	18.0	5.9	842.3	25.3	35.2	-1.5	-1,518	-45,030	-4,203	-50,433
24	18.5	5.6	861.9	25.9	36.0	-2.3	-2,340	-69,420	-6,479	-77,750
25	19.0	5.3	882.8	26.5	36.9	-3.2	-3,215	-95,373	-8,901	-106,818
26	19.5	5.0	905.0	27.1	37.8	-4.1	-4,141	-122,844	-11,465	-137,585
27	20.0	4.8	928.3	27.8	38.8	-5.1	-5,116	-151,791	-14,167	-170,006
28	20.5	4.5	952.8	28.6	39.8	-6.1	-6,141	-182,178	-17,003	-204,040
29	21.0	4.3	978.4	29.4	40.9	-7.2	-7,212	-213,972	-19,971	-239,649
30	21.5	4.1	1,005.2	30.2	42.0	-8.3	-8,330	-247,143	-23,067	-276,800
31	22.0	3.9	1,033.0	31.0	43.2	-9.5	-9,494	-281,663	-26,289	-315,463
32	22.5	3.8	1,061.9	31.9	44.4	-10.7	-10,702	-317,507	-29,634	-355,608
33	23.0	3.6	1,091.8	32.8	45.7	-12.0	-11,954	-354,653	-33,101	-397,211
34	23.5	3.5	1,122.8	33.7	47.0	-13.2	-13,249	-393,079	-36,687	-440,248
35	24.0	3.3	1,154.8	34.6	48.3	-14.6	-14,587	-432,766	-40,392	-484,698
36	24.5	3.2	1,187.8	35.6	49.7	-16.0	-15,966	-473,698	-44,212	-530,541

En la Tabla 1 se muestra cómo varía el peso de los envases pet de 1500 ml en función de sus dimensiones (diámetro y altura). En todos los casos la forma básica del envase se mantiene, variando sólo su diámetro y altura. Los pesos obtenidos se comparan con el peso del actual diseño del envase, y se calcula el peso de material ahorrado para las dimensiones indicadas. Luego, este peso de material ahorrado se transforma a botellas ahorradas y Costo Total Ahorrado.

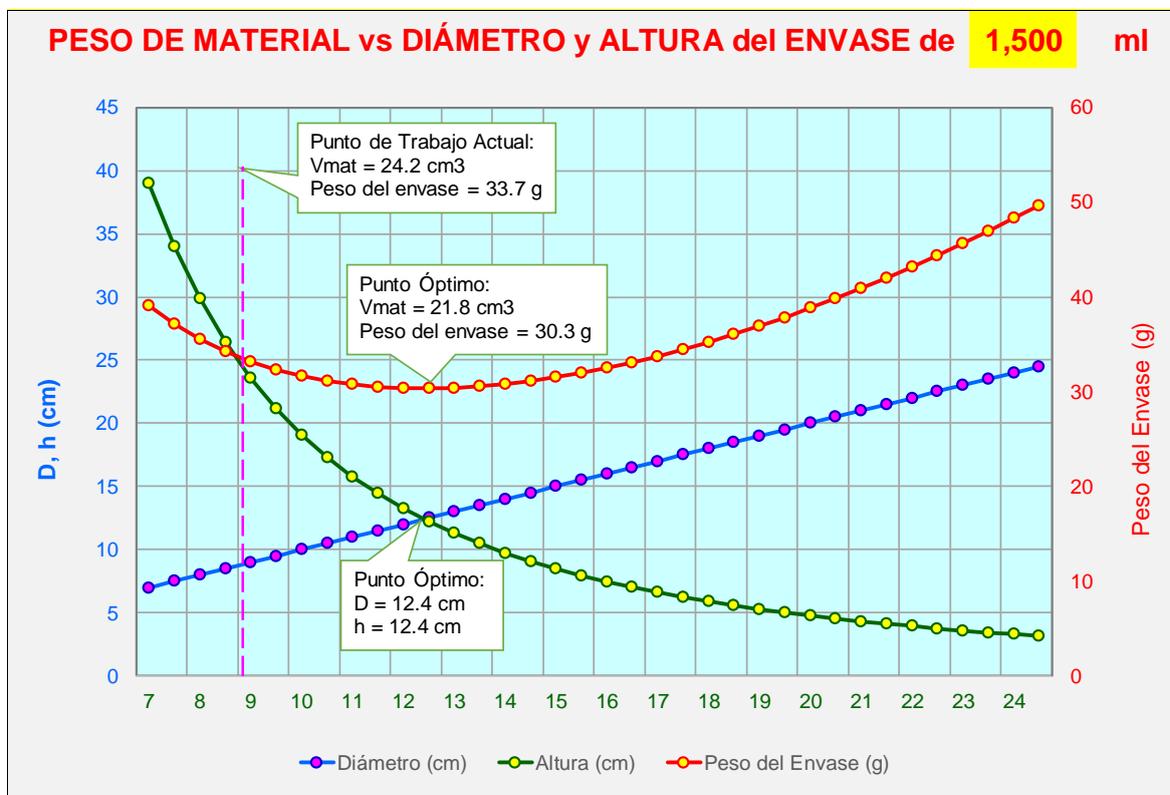
De acuerdo a los resultados, se observa que por ejemplo para los envases pet de 1500 ml, si se aumentara su diámetro en 1,26 cm y se redujera su altura actual en 5,5 cm, entonces se ahorraría 2,90 gr por envase, lo que para un nivel de producción de 1'000,000 de botellas sopladas al mes, representa un ahorro de casi U.S.\$ 100,000 al año.

Entonces, se puede observar que si se elige convenientemente el diámetro, la altura y el espesor del envase, se tendría como consecuencia un menor peso de material en el envase, lo cual es el objetivo del presente trabajo.

En el caso de los diferentes formatos de cualquiera de los envases pet, se podría lograr un considerable ahorro utilizando preformas de menor peso para el soplado de las botellas, es decir, que se podría usar preformas de 1 ó 2 gramos menos que las actuales, con la condición de elegir convenientemente la altura y el diámetro de la botella.

En la gráfica de la Figura 1 se visualiza los resultados del modelamiento, al variar el diámetro y la altura.

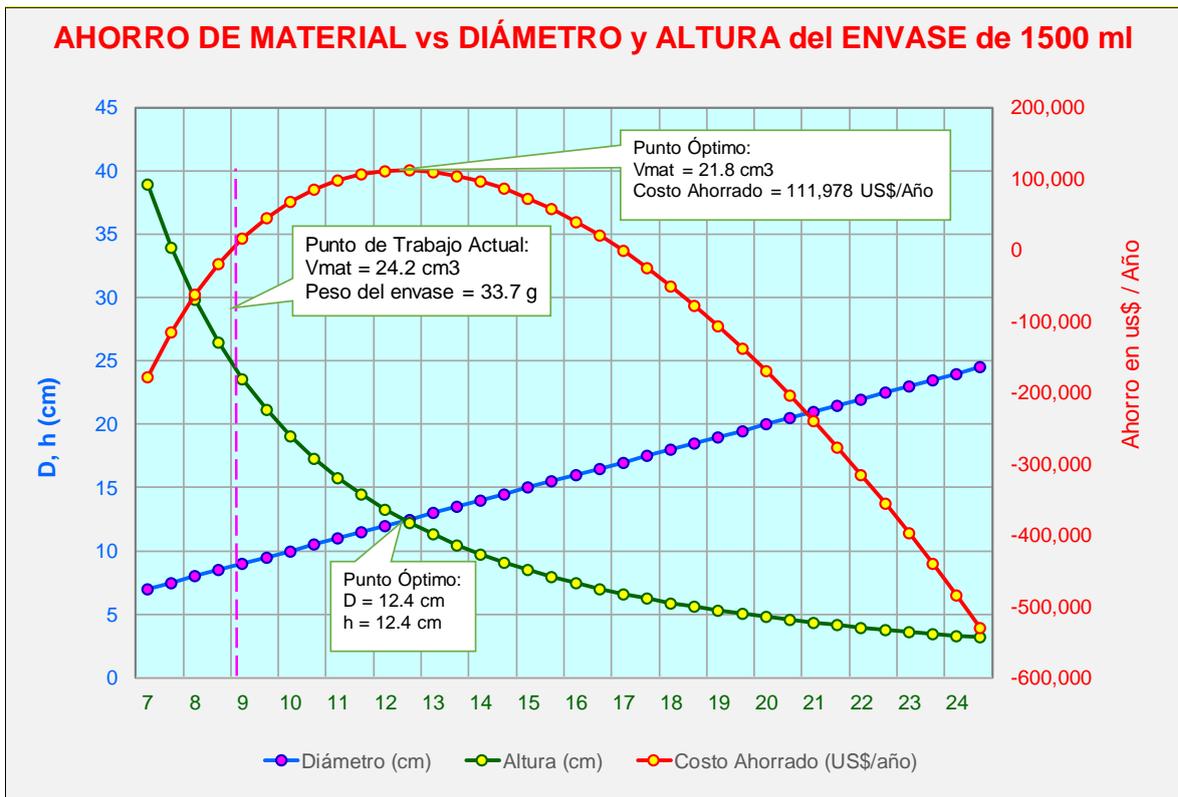
**Figura 1.** *Peso de una botella pet de 1500 cc vs diámetro y altura*



Nota: Elaboración propia

En la gráfica de la Figura 1 se puede observar que el punto óptimo para la relación diámetro/altura es igual a la unidad, es decir, cuando el diámetro  $D = 12.4$  cm y la altura  $h = 12.4$  cm; asimismo se puede observar que el punto óptimo correspondiente en la curva de Peso del Envase (línea color rojo) indica el menor peso de material para los envases con capacidad de 1,500 ml, que es 30.3 g que equivale a un volumen de material de  $V_{mat} = 21.8 \text{ cm}^3$ . Si se compara los valores óptimos encontrados, con los valores que se utilizan actualmente en la elaboración de estos envases, se tiene:  $D = 8.8$  cm,  $h = 24.9$  cm,  $V_{mat} = 24.2 \text{ cm}^3$ , Peso del envase = 33.7 g, se puede ver entonces que el peso ahorrado sería de 33.7 g menos 30.3 g, que es igual a 3.4 g, lo cual es una cantidad considerable si se multiplica por la cantidad de envases producidos.

**Figura 2.** Ahorro de material en botella pet de 1500 cc vs diámetro y altura

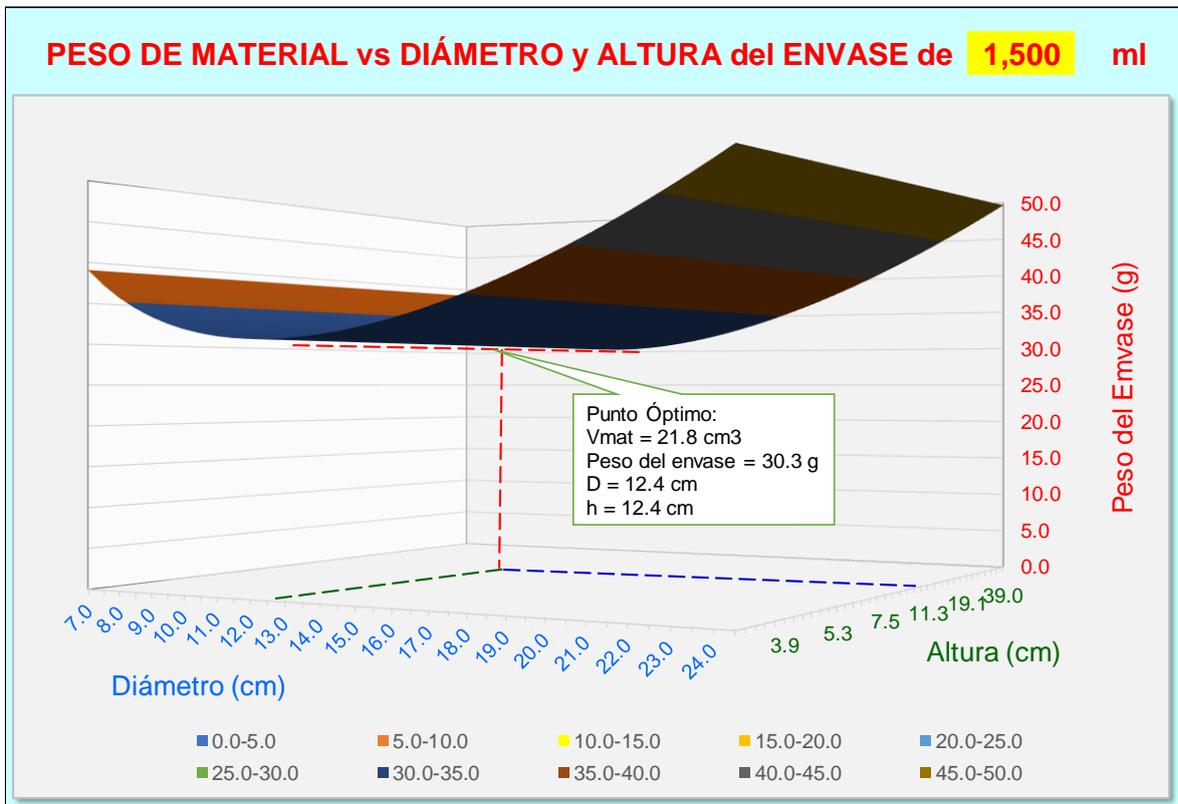


Nota: Elaboración propia

En la gráfica de la Figura 2 se puede observar que el punto óptimo para la relación diámetro/altura es igual a la unidad, es decir, cuando el diámetro  $D = 12.4$  cm y la altura  $h = 12.4$  cm; asimismo se puede observar que el punto óptimo correspondiente en la curva de Ahorro (línea color rojo) indica el mayor ahorro de material para los envases con capacidad de 1,500 ml, que es US\$ 111,978.

Y por último, en la Figura 3 se representa la gráfica en tres dimensiones.

**Figura 3.** *Peso de una botella pet de 1500 cc vs diámetro y altura en 3D*



Nota: Elaboración propia

En la gráfica de la Figura 3 se puede observar el punto óptimo para el envase con capacidad de 1500 ml, en la parte baja e inferior del plano curvado, para el diámetro 12.4 cm y altura 12.4 cm, se obtiene el menor volumen de material y por lo tanto el menor peso de material para el envase en cuestión. En dicho punto de menor peso de material, corresponde también el mayor ahorro de material para los envases con capacidad de 1,500 ml.

## Resultados del Objetivo Específico 2

El modelo de optimización volumétrico propuesto contempla dentro de sus restricciones, el volumen; en este sentido y de acuerdo a lo que pretende el objetivo específico 1: "Determinar la relación diámetro/altura óptima de un envase de 1000 ml, aplicando un modelo de optimización volumétrico", se realizó el modelamiento con el volumen 1000 ml.

**Tabla 2.** Variación del Peso del envase y Ahorro de material vs Diámetro y Altura de Envases de 1000 ml

N°	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área Total (cm <sup>2</sup> )	Volumen de Material (cm <sup>3</sup> )	Peso del Envase (g)	Peso Ahorrado (g) / Envase	Peso Ahorrado (kg) / Mes	Ahorro Equivalente en Envases / Mes	Costo Ahorrado (US\$/mes)	Costo Ahorrado (US\$/año)
1	7.0	26.0	648.4	18.8	26.2	-2.1	-1,562	-64,724	-4,794	-57,530
2	7.5	22.6	621.7	18.0	25.1	-1.0	-752	-31,166	-2,309	-27,702
3	8.0	19.9	600.5	17.4	24.3	-0.1	-110	-4,579	-339	-4,070
4	8.5	17.6	584.1	16.9	23.6	0.5	388	16,095	1,192	14,306
5	9.0	15.7	571.7	16.6	23.1	1.0	764	31,675	2,346	28,154
6	9.5	14.1	562.8	16.3	22.8	1.4	1,033	42,810	3,171	38,051
7	10.0	12.7	557.1	16.2	22.5	1.6	1,207	50,019	3,705	44,459
8	10.5	11.5	554.1	16.1	22.4	1.7	1,296	53,722	3,979	47,751
9	11.0	10.5	553.7	16.1	22.4	1.7	1,309	54,262	4,019	48,231
10	11.5	9.6	555.6	16.1	22.5	1.7	1,253	51,923	3,846	46,152
11	12.0	8.8	559.5	16.2	22.6	1.5	1,133	46,942	3,477	41,725
12	12.5	8.1	565.4	16.4	22.9	1.3	954	39,518	2,927	35,125
13	13.0	7.5	573.2	16.6	23.2	1.0	719	29,817	2,209	26,503
14	13.5	7.0	582.6	16.9	23.6	0.6	434	17,985	1,332	15,986
15	14.0	6.5	593.6	17.2	24.0	0.1	100	4,142	307	3,682
16	14.5	6.1	606.1	17.6	24.5	-0.4	-280	-11,604	-860	-10,314
17	15.0	5.7	620.1	18.0	25.1	-0.9	-704	-29,162	-2,160	-25,921
18	15.5	5.3	635.4	18.4	25.7	-1.6	-1,169	-48,453	-3,589	-43,067
19	16.0	5.0	652.1	18.9	26.4	-2.2	-1,675	-69,406	-5,141	-61,692
20	16.5	4.7	670.1	19.4	27.1	-3.0	-2,219	-91,960	-6,812	-81,739
21	17.0	4.4	689.3	20.0	27.9	-3.7	-2,801	-116,061	-8,597	-103,161
22	17.5	4.2	709.6	20.6	28.7	-4.6	-3,418	-141,661	-10,493	-125,915
23	18.0	3.9	731.2	21.2	29.6	-5.4	-4,071	-168,717	-12,497	-149,964
24	18.5	3.7	753.8	21.9	30.5	-6.3	-4,758	-197,191	-14,606	-175,273
25	19.0	3.5	777.6	22.5	31.4	-7.3	-5,479	-227,049	-16,818	-201,813
26	19.5	3.3	802.4	23.3	32.4	-8.3	-6,232	-258,260	-19,130	-229,555
27	20.0	3.2	828.3	24.0	33.5	-9.4	-7,017	-290,798	-21,540	-258,476
28	20.5	3.0	855.2	24.8	34.6	-10.4	-7,833	-324,637	-24,046	-288,554
29	21.0	2.9	883.2	25.6	35.7	-11.6	-8,681	-359,754	-26,647	-319,768
30	21.5	2.8	912.1	26.5	36.9	-12.7	-9,559	-396,130	-29,342	-352,101
31	22.0	2.6	942.1	27.3	38.1	-14.0	-10,466	-433,746	-32,128	-385,536
32	22.5	2.5	973.0	28.2	39.3	-15.2	-11,403	-472,585	-35,005	-420,057
33	23.0	2.4	1,004.9	29.1	40.6	-16.5	-12,370	-512,631	-37,971	-455,653
34	23.5	2.3	1,037.7	30.1	41.9	-17.8	-13,365	-553,871	-41,026	-492,309
35	24.0	2.2	1,071.4	31.1	43.3	-19.2	-14,388	-596,291	-44,168	-530,014
36	24.5	2.1	1,106.1	32.1	44.7	-20.6	-15,440	-639,881	-47,397	-568,759

En la Tabla 2 se muestra cómo varía el peso de los envases pet de 1000 ml en función de sus dimensiones (diámetro y altura). En todos los casos la forma básica del envase se mantiene, variando sólo su diámetro y altura. Los pesos obtenidos se comparan con el peso del actual diseño del envase, y se calcula el peso de material ahorrado para las dimensiones indicadas. Luego, este peso de material ahorrado se transforma a botellas ahorradas y Costo Total Ahorrado.

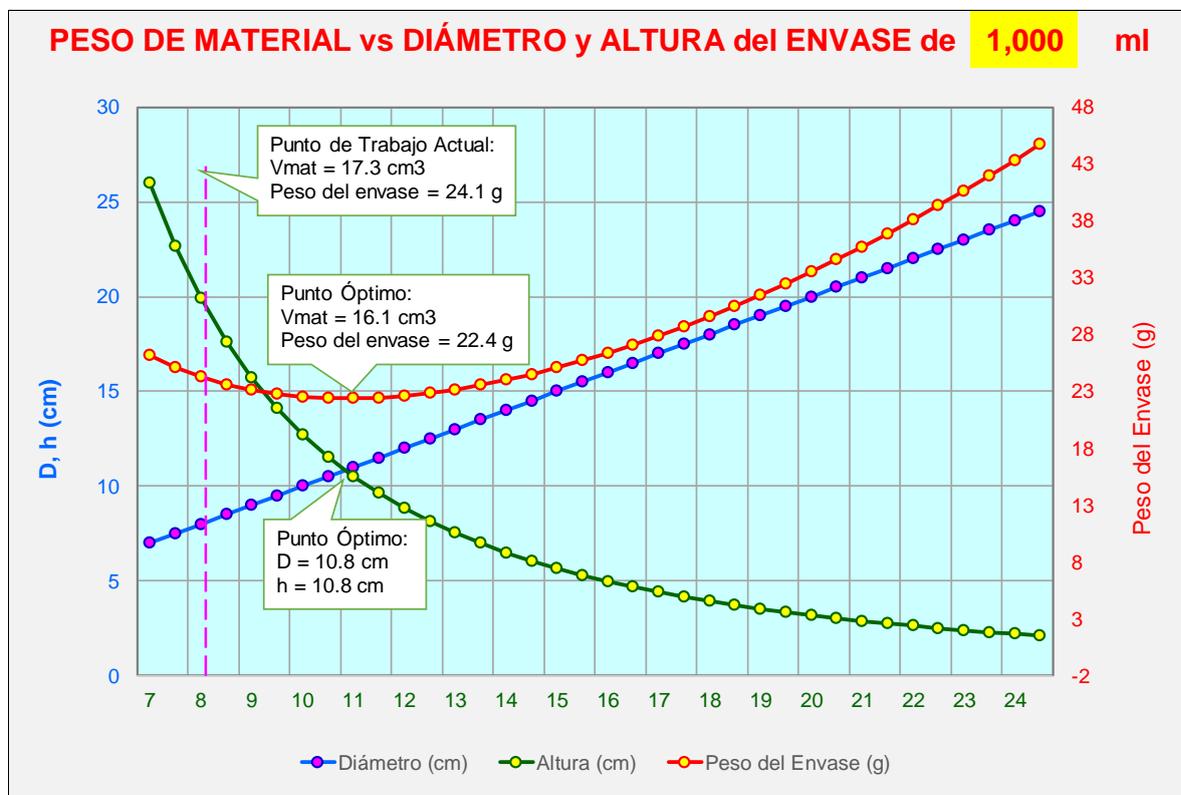
De acuerdo a los resultados, se observa que por ejemplo para los envases pet de 1000 ml, si se aumentara su diámetro de 8.1 cm (valor actual) a 9,5 cm y se redujera su altura actual de 19.4 cm (valor actual) a 14.1 cm, entonces se ahorraría 1,3 gr por envase, lo que, para un nivel de producción de 42,810 botellas sopladas al mes, representa un ahorro de casi U.S.\$ 38,051 al año.

Entonces, se puede observar que, si se elige convenientemente el diámetro, la altura y el espesor del envase, se tendría como consecuencia un menor peso de material en el envase, lo cual es el objetivo del presente trabajo.

En el caso de los diferentes formatos de cualquiera de los envases pet, se podría lograr un considerable ahorro utilizando preformas de menor peso para el soplado de las botellas, es decir, que se podría usar preformas de 1 ó 2 gramos menos que las actuales, con la condición de elegir convenientemente la altura y el diámetro de la botella.

En la gráfica de la Figura 4 se visualiza los resultados del modelamiento, al variar el diámetro y la altura.

**Figura 4.** *Peso de una botella pet de 1000 cc vs diámetro y altura*

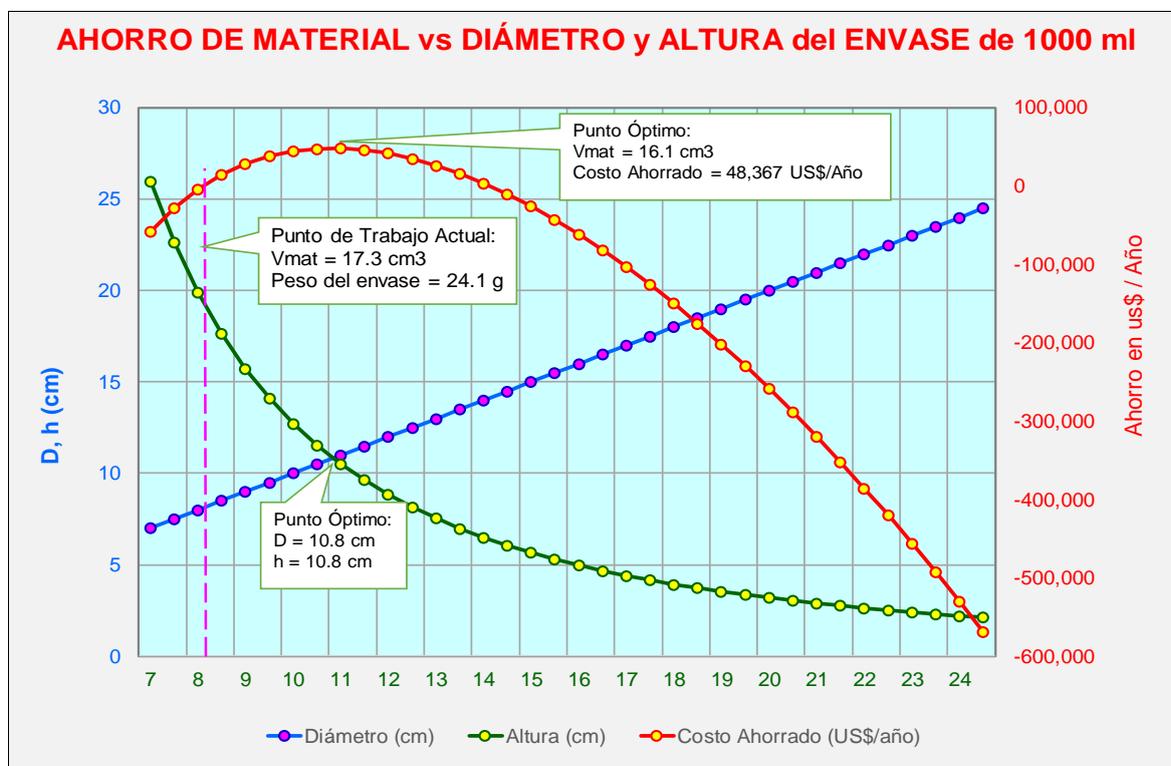


Nota: Elaboración propia

En la gráfica de la Figura 4 se puede observar que el punto óptimo para la relación diámetro/altura es igual a la unidad, es decir, cuando el diámetro  $D = 10.8$  cm y la altura  $h = 10.8$  cm; asimismo se puede observar que el punto óptimo correspondiente en la curva de Peso del Envase (línea color rojo) indica el menor peso de material para los envases con capacidad de 1,000 ml, que es 22.4 g que equivale a un volumen de material de  $V_{mat} = 16.1$  cm<sup>3</sup>. Si se compara los valores óptimos encontrados, con los valores que se utilizan actualmente en la elaboración de estos envases, se tiene:  $D = 8.1$  cm,  $h = 19.4$  cm,  $V_{mat} = 17.3$  cm<sup>3</sup>, Peso del envase = 24.1 g, se puede ver entonces que el peso ahorrado sería de 24.1 g menos 22.4 g, que es igual a 1.7 g, lo cual es una cantidad considerable si se multiplica por la cantidad de envases producidos.

En la gráfica de la Figura 5 se puede observar que el punto óptimo para la relación diámetro/altura es igual a la unidad, es decir, cuando el diámetro  $D = 10.8$  cm y la altura  $h = 10.8$  cm; asimismo se puede observar que el punto óptimo correspondiente en la curva de Ahorro (línea color rojo) indica el mayor ahorro de material para los envases con capacidad de 1,000 ml, que es US\$ 48,367 al año.

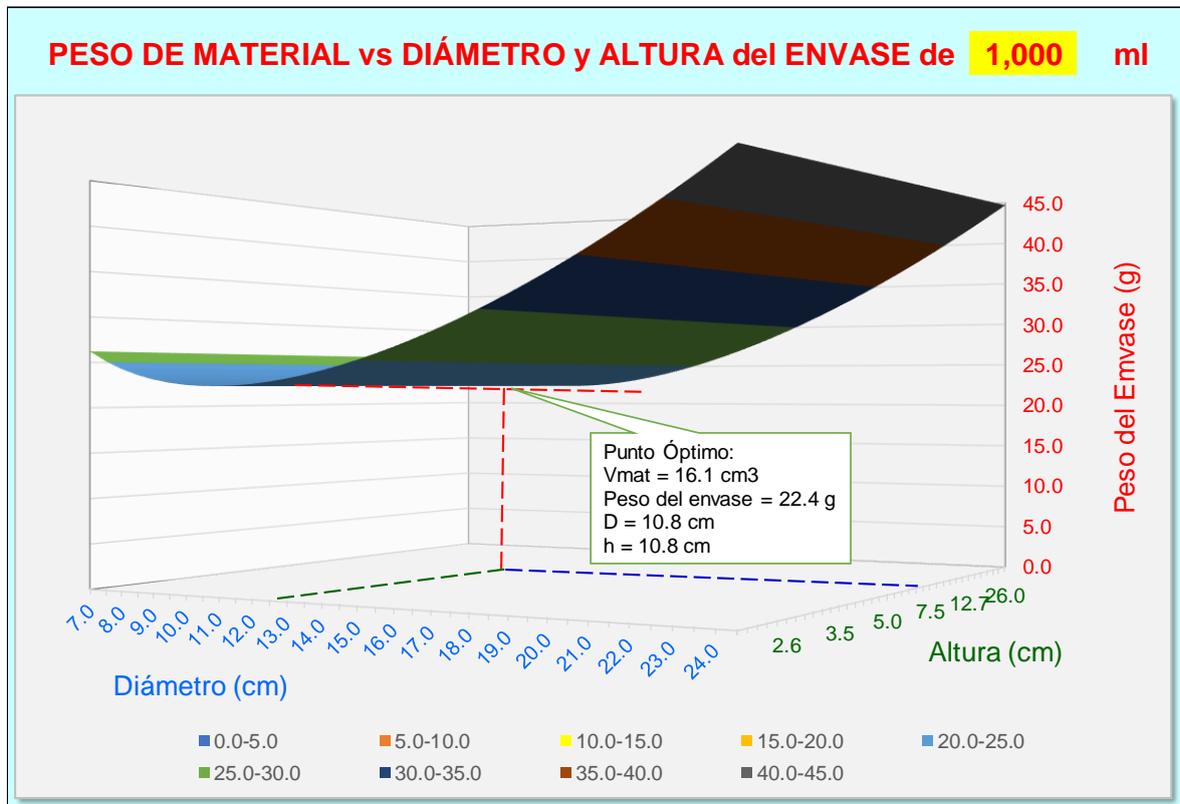
**Figura 5.** Ahorro de material en botella pet de 1000 cc vs diámetro y altura



Nota: Elaboración propia

Y por último, en la Figura 6 se representa la gráfica en tres dimensiones.

**Figura 6.** *Peso de una botella pet de 1000 cc vs diámetro y altura en 3D*



Nota: Elaboración propia

En la gráfica de la Figura 6 se puede observar el punto óptimo para el envase con capacidad de 1000 ml, en la parte baja e inferior del plano curvado, para el diámetro 10.8 cm y altura 10.8 cm, se obtiene el menor volumen de material y por lo tanto el menor peso de material para el envase en cuestión. En dicho punto de menor peso de material, corresponde también el mayor ahorro de material para los envases con capacidad de 1,000 ml.

### Resultados del Objetivo Específico 3

El modelo de optimización volumétrico propuesto contempla dentro de sus restricciones, el volumen; en este sentido y de acuerdo a lo que pretende el objetivo específico 1: “Determinar la relación diámetro/altura óptima de un envase de 500 ml, aplicando un modelo de optimización volumétrico”, se realizó el modelamiento con el volumen 500 ml.

**Tabla 3.** Variación del Peso del envase y Ahorro de material vs Diámetro y Altura de Envases de 500 ml

N°	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área Total (cm <sup>2</sup> )	Volumen de Material (cm <sup>3</sup> )	Peso del Envase (g)	Peso Ahorrado (g) / Envase	Peso Ahorrado (kg) / Mes	Ahorro Equivalente en Envases / Mes	Costo Ahorrado (US\$/mes)	Costo Ahorrado (US\$/año)
1	5.0	25.5	439.3	13.2	18.4	-2.7	-4,909	-313,803	-32,803	-393,634
2	5.5	21.0	411.2	12.3	17.2	-1.6	-2,792	-178,502	-18,659	-223,913
3	6.0	17.7	389.9	11.7	16.3	-0.7	-1,191	-76,144	-7,960	-95,515
4	6.5	15.1	374.1	11.2	15.6	0.0	0	0	0	0
5	7.0	13.0	362.7	10.9	15.2	0.5	856	54,738	5,722	68,664
6	7.5	11.3	355.0	10.7	14.8	0.8	1,433	91,596	9,575	114,897
7	8.0	9.9	350.5	10.5	14.7	1.0	1,771	113,216	11,835	142,018
8	8.5	8.8	348.8	10.5	14.6	1.1	1,903	121,622	12,714	152,563
9	9.0	7.9	349.5	10.5	14.6	1.0	1,852	118,386	12,375	148,503
10	9.5	7.1	352.3	10.6	14.7	0.9	1,639	104,748	10,950	131,396
11	10.0	6.4	357.1	10.7	14.9	0.7	1,278	81,703	8,541	102,489
12	10.5	5.8	363.7	10.9	15.2	0.4	783	50,055	5,232	62,789
13	11.0	5.3	371.9	11.2	15.6	0.1	164	10,461	1,094	13,122
14	11.5	4.8	381.7	11.4	16.0	-0.3	-572	-36,535	-3,819	-45,830
15	12.0	4.4	392.9	11.8	16.4	-0.8	-1,415	-90,481	-9,458	-113,499
16	12.5	4.1	405.4	12.2	17.0	-1.3	-2,362	-150,996	-15,784	-189,409
17	13.0	3.8	419.3	12.6	17.5	-1.9	-3,406	-217,758	-22,763	-273,155
18	13.5	3.5	434.4	13.0	18.2	-2.5	-4,544	-290,493	-30,366	-364,394
19	14.0	3.2	450.7	13.5	18.8	-3.2	-5,772	-368,965	-38,569	-462,830
20	14.5	3.0	468.2	14.0	19.6	-3.9	-7,086	-452,973	-47,351	-568,210
21	15.0	2.8	486.8	14.6	20.4	-4.7	-8,484	-542,341	-56,693	-680,313
22	15.5	2.6	506.4	15.2	21.2	-5.5	-9,963	-636,916	-66,579	-798,947
23	16.0	2.5	527.1	15.8	22.0	-6.4	-11,522	-736,563	-76,995	-923,945
24	16.5	2.3	548.9	16.5	23.0	-7.3	-13,158	-841,166	-87,930	-1,055,159
25	17.0	2.2	571.6	17.1	23.9	-8.3	-14,871	-950,621	-99,372	-1,192,459
26	17.5	2.1	595.3	17.9	24.9	-9.3	-16,657	-1,064,835	-111,311	-1,335,729
27	18.0	2.0	620.0	18.6	25.9	-10.3	-18,517	-1,183,727	-123,739	-1,484,868
28	18.5	1.9	645.7	19.4	27.0	-11.4	-20,449	-1,307,225	-136,649	-1,639,783
29	19.0	1.8	672.3	20.2	28.1	-12.5	-22,452	-1,435,262	-150,033	-1,800,393
30	19.5	1.7	699.9	21.0	29.3	-13.6	-24,525	-1,567,781	-163,885	-1,966,624
31	20.0	1.6	728.3	21.8	30.5	-14.8	-26,667	-1,704,729	-178,201	-2,138,412
32	20.5	1.5	757.7	22.7	31.7	-16.0	-28,878	-1,846,058	-192,975	-2,315,695
33	21.0	1.4	788.0	23.6	33.0	-17.3	-31,157	-1,991,725	-208,202	-2,498,420
34	21.5	1.4	819.1	24.6	34.3	-18.6	-33,503	-2,141,691	-223,878	-2,686,538
35	22.0	1.3	851.2	25.5	35.6	-20.0	-35,915	-2,295,922	-240,000	-2,880,004
36	22.5	1.3	884.1	26.5	37.0	-21.3	-38,394	-2,454,384	-256,565	-3,078,779

En la Tabla 3 se muestra cómo varía el peso de los envases pet de 500 ml en función de sus dimensiones (diámetro y altura). En todos los casos la forma básica del envase se mantiene, variando sólo su diámetro y altura. Los pesos obtenidos se comparan con el peso del actual diseño del envase, y se calcula el peso de material ahorrado para las dimensiones indicadas. Luego, este peso de material ahorrado se transforma a botellas ahorradas y Costo Total Ahorrado.

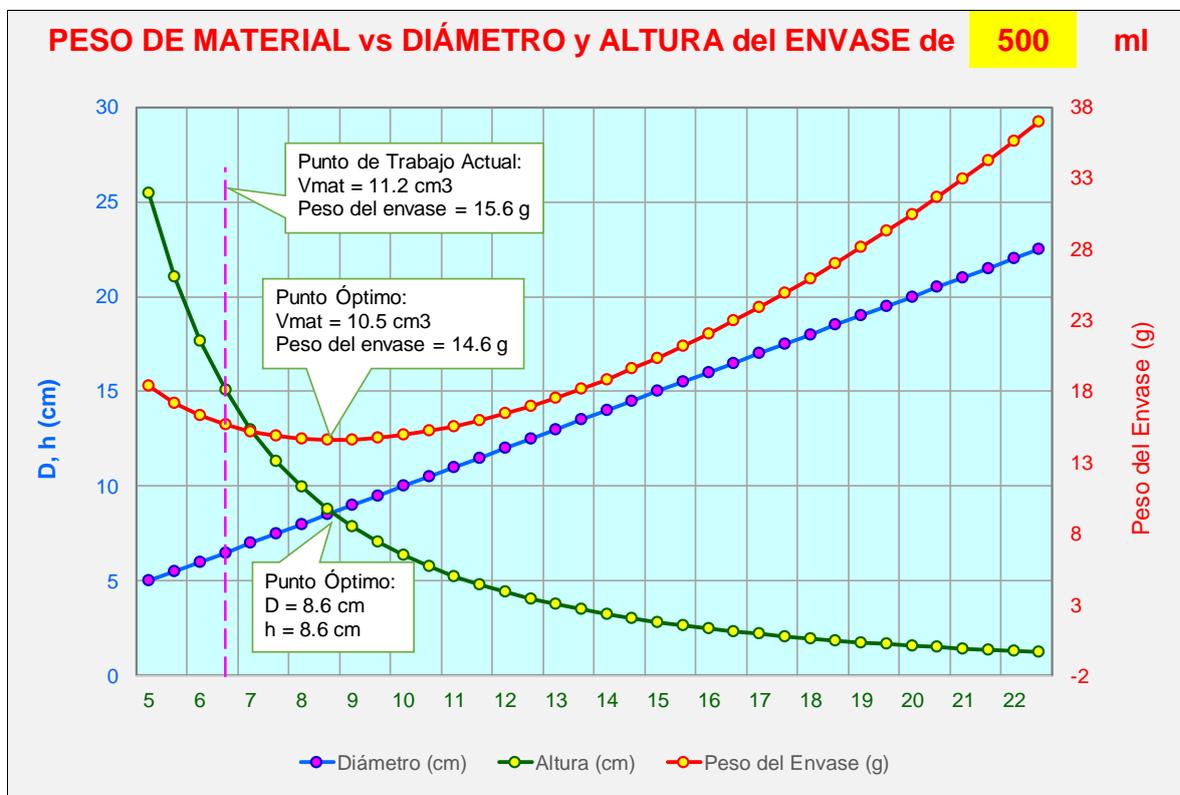
De acuerdo a los resultados, se observa que por ejemplo para los envases pet de 500 ml, si se aumentara su diámetro de 6.5 cm (valor actual) a 7,5 cm y se redujera su altura actual de 15.1 cm (valor actual) a 11.3 cm, entonces se ahorraría 1,0 g por envase, lo que para un nivel de producción de 91,596 botellas sopladas al mes, representa un ahorro de casi U.S.\$ 114,897 al año.

Entonces, se puede observar que si se elige convenientemente el diámetro, la altura y el espesor del envase, se tendría como consecuencia un menor peso de material en el envase, lo cual es el objetivo del presente trabajo.

En el caso de los diferentes formatos de cualquiera de los envases pet, se podría lograr un considerable ahorro utilizando preformas de menor peso para el soplado de las botellas, es decir, que se podría usar preformas de 1 ó 2 gramos menos que las actuales, con la condición de elegir convenientemente la altura y el diámetro de la botella.

En la gráfica de la Figura 7 se visualiza los resultados del modelamiento, al variar el diámetro y la altura.

**Figura 7.** *Peso de una botella pet de 500 cc vs diámetro y altura*

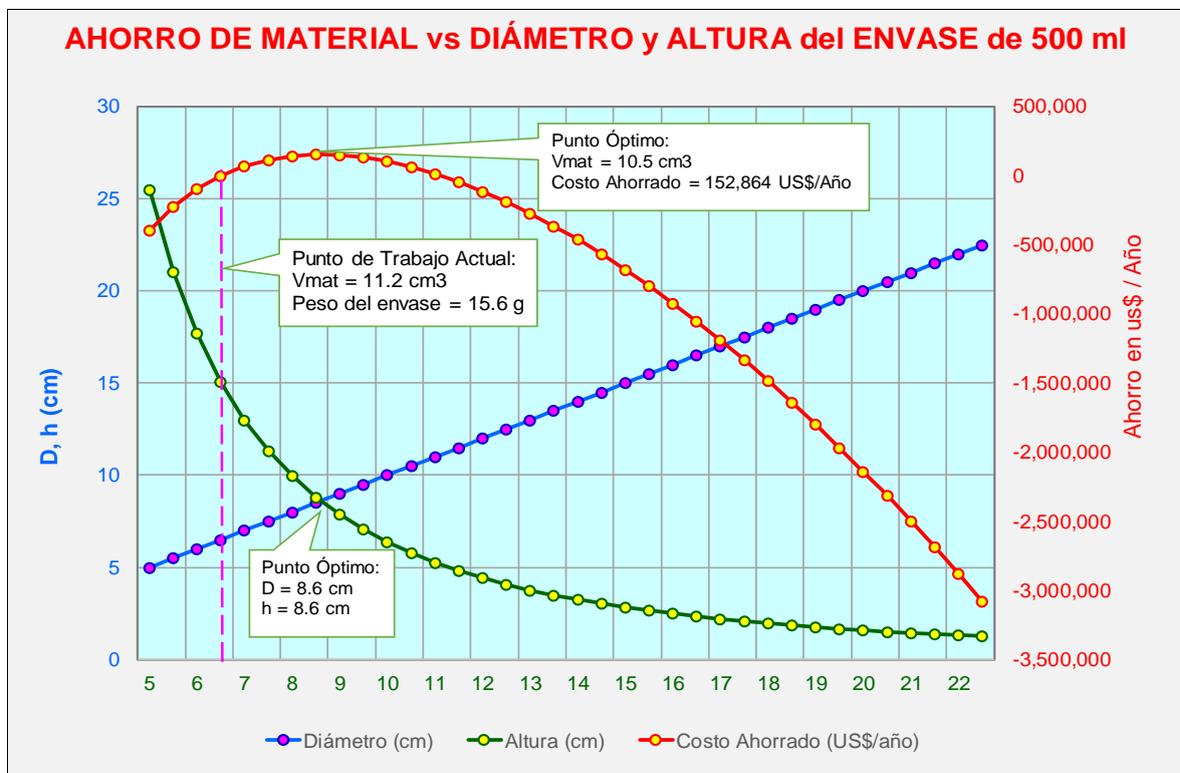


Nota: Elaboración propia

En la gráfica de la Figura 7 se puede observar que el punto óptimo para la relación diámetro/altura es igual a la unidad, es decir, cuando el diámetro  $D = 8.6$  cm y la altura  $h = 8.6$  cm; asimismo se puede observar que el punto óptimo correspondiente en la curva de Peso del Envase (línea color rojo) indica el menor peso de material para los envases con capacidad de 500 ml, que es 14.6 g que equivale a un volumen de material de  $V_{mat} = 10.5$  cm<sup>3</sup>. Si se compara los valores óptimos encontrados, con los valores que se utilizan actualmente en la elaboración de estos envases, se tiene:  $D = 6.5$  cm,  $h = 15.1$  cm,  $V_{mat} = 11.2$  cm<sup>3</sup>, Peso del envase = 15.6 g, se puede ver entonces que el peso ahorrado sería de 15.6 g menos 14.6 g, que es igual a 1.0 g, lo cual es una cantidad considerable si se multiplica por la cantidad de envases producidos.

En la gráfica de la Figura 8 se puede observar que el punto óptimo para la relación diámetro/altura es igual a la unidad, es decir, cuando el diámetro  $D = 8.6$  cm y la altura  $h = 8.6$  cm; asimismo se puede observar que el punto óptimo correspondiente en la curva de Ahorro (línea color rojo) indica el mayor ahorro de material para los envases con capacidad de 500 ml, que es US\$ 152,864 al año.

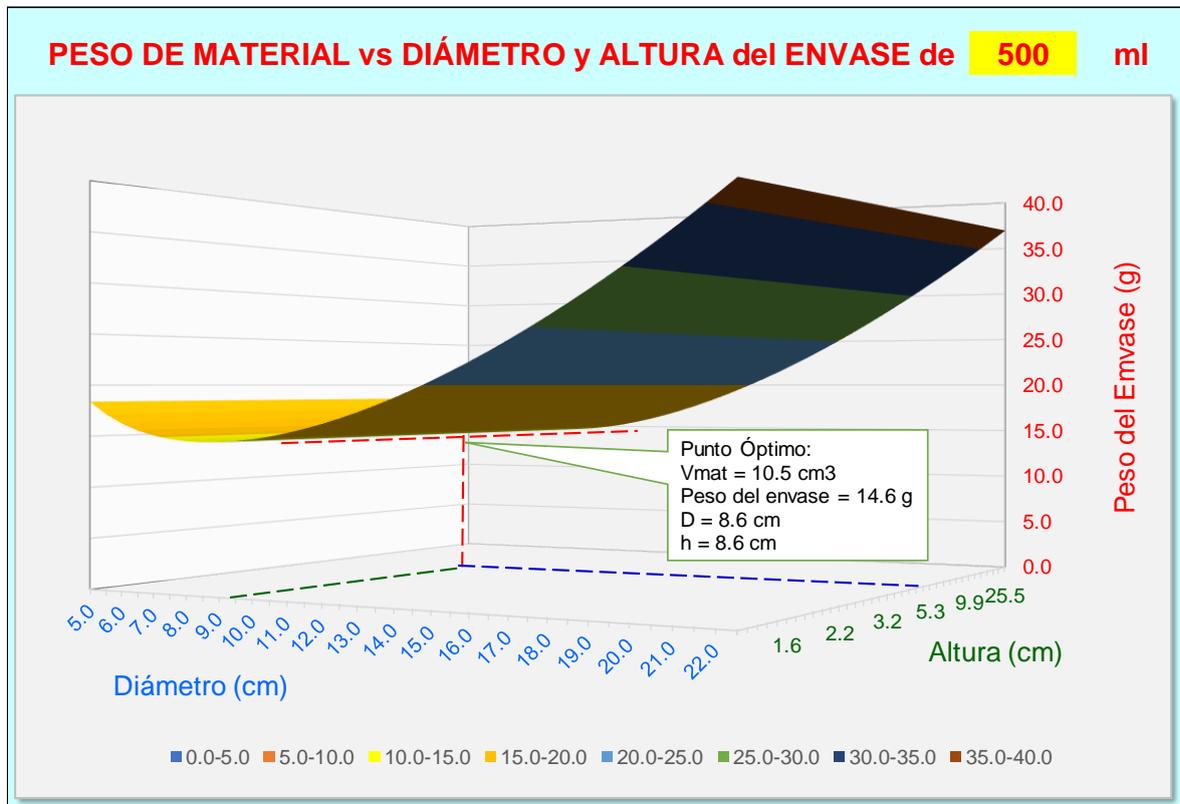
**Figura 8.** Ahorro de material en botella pet de 500 cc vs diámetro y altura



Nota: Elaboración propia

Y por último, en la Figura 9 se representa la gráfica en tres dimensiones.

**Figura 9.** *Peso de una botella pet de 500 cc vs diámetro y altura en 3D*



En la gráfica de la Figura 9 se puede observar el punto óptimo para el envase con capacidad de 500 ml, en la parte baja e inferior del plano curvado, para el diámetro 8.6 cm y altura 8.6 cm, se obtiene el menor volumen de material y por lo tanto el menor peso de material para el envase en cuestión. En dicho punto de menor peso de material, corresponde también el mayor ahorro de material para los envases con capacidad de 500 ml.

Como parte de las restricciones, se ha considerado que, para mantener un nivel de uniformidad en el envase pet, éste debe tener una relación de estirado longitudinal de 2.5 y una relación de estirado de superficie cuatro veces mayor que el estirado longitudinal.

## V. DISCUSIÓN

La mayoría de los envases plásticos están fabricados con material Pet (Tereftalato de Polietileno) (Rebaza, 2020), el cual es un polímero termoplástico que tiene excelentes propiedades de barrera, transparencia y resistencia mecánica, que lo hacen apto para su uso en la fabricación de envases (Lontos & Gregoriou, 2019). Desde que en la industria de envases y bebidas hicieron su aparición los envases pet, siempre se está buscando su aligeramiento (bottle lighweighting), ligando el ahorro en el costo final con un ahorro en el peso; y como consecuencia, ya sea por razones de costos o por responsabilidad ambiental, el objetivo principal en la industria de envases, es reducir u optimizar el peso de los envases pet (Arto, 2022); lo que se ajusta con el objetivo principal de esta investigación que es, determinar la relación óptima entre las dimensiones y el volumen de las botellas pet, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico.

Los resultados obtenidos muestran que en general, todas las botellas pet pueden ser fabricadas de forma óptima, es decir, que se pueden elegir convenientemente las dimensiones de un envase para el cual el peso sea el mínimo; por lo tanto, existe una relación óptima entre las dimensiones, el volumen y el peso de un envase pet, lo cual ocurre (para un envase de forma cilíndrica), cuando su diámetro es igual a su altura. Esto se ha demostrado en el capítulo iv de Resultados, utilizando un modelo de optimización volumétrico, el cual consiste en una ecuación o función objetivo, deducida mediante el cálculo del volumen del envase a partir de sus dimensiones: diámetro y altura del envase, para tres diferentes capacidades: 1,500 ml, 1,000 ml y 500 ml, manteniendo su espesor constante en cada caso.

Los resultados obtenidos muestran que para utilizar la menor cantidad o el menor peso de material pet en un envase, se debe hacer que su diámetro sea igual a su altura; este resultado se obtuvo optimizando la función matemática  $V_{mat} = f(D)$  que es la función objetivo que da la cantidad de material pet en función del diámetro del envase; luego, aplicando el cálculo diferencial se encuentra la derivada de dicha función y se iguala a cero y finalmente se

encuentra el diámetro (y la altura) para el cual el peso del envase es el mínimo. Este es un problema de optimización en el que se ha usado un algoritmo matemático que garantiza el resultado; de la misma manera que lo hizo Calixto (2021) en su tesis, cuyo objetivo general fue determinar en qué medida la utilización de un software matemático optimiza los cortes de hojalata durante la producción de envases en una empresa industrial de estampados metálicos y como objetivos específicos el reducir las mermas y los costos por mermas de hojalata; este software utilizaba un algoritmo matemático para determinar los mejores cortes de hojalata en función de las dimensiones de la plancha original y de la distribución de los diferentes cortes que debería de hacer sobre la superficie de la plancha de hojalata, de manera que minimizaba la cantidad de residuos, logrando reducir el porcentaje de mermas significativamente, y cuya conclusión fue que, el software de optimización de cortes, mejora la producción de los envases, aumentando también la productividad en la empresa. Este enfoque matemático de optimización o minimización es similar al que se ha usado en el estudio.

Teniendo en cuenta el primer objetivo específico que fue: determinar la relación diámetro/altura óptima de las botellas pet de 1,500 ml, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico, los resultados demuestran que el punto óptimo para la relación diámetro/altura de los envases de 1,500 ml, es igual a la unidad, y ocurre cuando el diámetro  $D_{\text{óptimo}} = 12.4$  cm es igual a la altura  $h_{\text{óptima}} = 12.4$  cm; asimismo, el peso óptimo ( $W_{\text{óptimo}}$ ) que corresponde a este diámetro y altura, que da el menor peso de material pet para los envases de 1,500 ml es:  $W_{\text{óptimo}} = 30.3$  g. Ahora, si se compara los valores óptimos encontrados, con los valores correspondientes que se utilizan actualmente en la elaboración de estos envases, se tiene:  $D_{\text{actual}} = 8.8$  cm,  $h_{\text{actual}} = 24.9$  cm,  $W_{\text{actual}} = 33.7$  g, se puede ver entonces que el peso de material pet ahorrado por cada envase de 1,500 ml es  $(W_{\text{actual}} - W_{\text{óptimo}}) = (33.7 - 30.3) = 3.4$  g.

Este resultado de 3.4 g es el valor máximo de material pet ahorrado por cada envase de 1,500 ml, obtenido mediante este modelo de optimización

volumétrico, y muestra que se puede ahorrar también 1 g, 2 g o 3 g, eligiendo de forma conveniente el diámetro y la altura del envase, de tal manera que sea económico y atractivo. Para la elección del diámetro y la altura convenientes, se puede utilizar la ecuación matemática del modelo o también se puede hacer la elección en forma gráfica (Ver Figura 1, Figura 2 y Figura 3), teniendo como parámetro la capacidad del envase de 1,500 ml. La relación de este resultado con el impacto en la industria de bebidas lo se puede apreciar desde el punto de vista de los costos de fabricación; para lo cual, si se multiplica el valor de 3.4 g de material pet ahorrado por cada envase por el nivel de 1 millón de botellas de 1,500 ml vendidas mensualmente, se obtiene un ahorro de US\$ 111,978 al año, lo cual justifica que el modelo propuesto se pueda implementar; sin embargo, existen restricciones que se deben de considerar para saber hasta qué punto se puede reducir el peso del envase sin perjudicar su calidad ni la estética del envase. Ramírez (2002, p. 28), en su tesis Estándares de Calidad para el proceso de producción de Botellas pet no retornables, encontró que la calidad del envase está dada por el espesor del envase el cual le da su alta resistencia mecánica y baja permeabilidad a gases y vapores; asimismo, indica que el diseño del envase debe ser atractivo, ya que representa la imagen que desea dar el fabricante al cliente, sin embargo, también indica que lo estético no debe comprometer de ninguna manera la permeabilidad ni la resistencia mecánica del envase (Lontos & Gregoriou, 2019). Por otro lado, también indica, que el nivel de uniformidad del envase depende de la relación de estirado u orientación biaxial durante el soplado de la botella (Lontos & Gregoriou, 2019) y recomienda una relación de estirado longitudinal de 2.5 y una relación de estirado de superficie cuatro veces mayor que el estirado longitudinal; estas relaciones de estirado están dentro de los rangos considerados en los datos y resultados de la presente investigación. La elección final depende de la forma propia de la botella y de las propiedades físicas requeridas.

En cuanto al segundo objetivo específico que fue: determinar la relación diámetro/altura óptima de las botellas pet de 1,000 ml, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico, los resultados demuestran que el punto óptimo para la relación diámetro/altura de los envases

de 1,000 ml, es igual a la unidad, y ocurre cuando el diámetro  $D_{\text{óptimo}} = 10.8$  cm es igual a la altura  $h_{\text{óptima}} = 10.8$  cm; asimismo, el peso óptimo ( $W_{\text{óptimo}}$ ) que corresponde a este diámetro y altura, que da el menor peso de material pet para los envases de 1,000 ml es:  $W_{\text{óptimo}} = 22.4$  g. Ahora, si se compara los valores óptimos encontrados, con los valores correspondientes que se utilizan actualmente en la elaboración de estos envases, se tiene:  $D_{\text{actual}} = 8.1$  cm,  $h_{\text{actual}} = 19.4$  cm,  $W_{\text{actual}} = 24.1$  g, se puede ver entonces que el peso de material pet ahorrado por cada envase de 1,000 ml es  $(W_{\text{actual}} - W_{\text{óptimo}}) = (24.1 - 22.4) = 1.7$  g.

Este resultado de 1.7 g es el valor máximo de material pet ahorrado por cada envase de 1,000 ml, obtenido mediante este modelo de optimización volumétrico, y muestra que se puede ahorrar también 0.5 g, 1 g o 1.5 g, eligiendo de forma conveniente el diámetro y la altura del envase, de tal manera que sea económico y atractivo. Para la elección del diámetro y la altura convenientes, se puede utilizar la ecuación matemática del modelo o también se puede hacer la elección en forma gráfica (ver Figura 4, Figura 5 y Figura 6), teniendo como parámetro la capacidad del envase de 1,000 ml. La relación de este resultado con el impacto en la industria de bebidas lo se puede apreciar desde el punto de vista de los costos de fabricación; para lo cual, si se multiplica el valor de 1.7 g de material pet ahorrado por cada envase por el nivel de 750,000 botellas de 1,000 ml vendidas mensualmente, se obtiene un ahorro de US\$ 48,367 al año, lo cual justifica que el modelo propuesto se pueda implementar; sin embargo, al igual que para los envases de 1,500 ml, existen restricciones que se deben de considerar para saber hasta qué punto se puede reducir el peso del envase sin perjudicar su calidad ni la estética del envase. En este punto, se puede considerar las mismas restricciones dadas por Ramírez (2002, pp. 28, 35 y 40) en su tesis Estándares de Calidad para el proceso de producción de Botellas pet no retornables, que se consideran en la discusión del objetivo específico 1 para los envases de 1,500 ml, es decir, que la calidad del envase está dada por el espesor del envase el cual le da su alta resistencia mecánica y baja permeabilidad a gases y vapores; asimismo, indica que el diseño del envase debe ser atractivo, ya que representa la imagen que desea dar el fabricante al cliente, sin embargo, también indica que

lo estético no debe comprometer de ninguna manera la permeabilidad ni la resistencia mecánica del envase (Lontos & Gregoriou, 2019). Por otro lado, también indica, que el nivel de uniformidad del envase depende de la relación de estirado u orientación biaxial durante el soplado de la botella (Lontos & Gregoriou, 2019) y recomienda una relación de estirado longitudinal de 2.5 y una relación de estirado de superficie cuatro veces mayor que el estirado longitudinal; estas relaciones de estirado están dentro de los rangos considerados en los datos y resultados de la presente investigación. La elección final depende de la forma propia de la botella y de las propiedades físicas requeridas.

También se puede citar a Hopmann & Twardowski (2018) quienes determinaron que para que los resultados de calidad, propiedades mecánicas y ópticas de una botella soplada sean óptimos, entonces el moldeo por soplado con estirado de las botellas debe ser biaxial, es decir, que durante el proceso de soplado de la botella a partir de una preforma, ésta debe ser sometida a un estiramiento longitudinal y a la vez radial. El soplado con biorientación concede al pet mejores propiedades mecánicas y una mayor impermeabilidad a los gases y vapores. Asimismo, con el propósito de mejorar las propiedades de los envases durante la fase de diseño, en la industria del moldeo de botellas por estirado y soplado, Hopmann & Twardowski (2018) utilizaron una simulación de prueba para determinar la resistencia al apilamiento mediante un proceso de optimización y de esta manera diseñar una geometría de preforma para mejorar las propiedades mecánicas de la botella, que incluye las dimensiones de los envases como: el diámetro, la altura y su espesor, lo cual concuerda con el objetivo de la presente investigación.

Hasta aquí, se puede ver que los resultados demuestran que el modelo matemático planteado funciona. Sin embargo, se deben de considerar también que en cuanto al tercer objetivo específico que fue: determinar la relación diámetro/altura óptima de las botellas pet de 500 ml, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico, los resultados demuestran que el punto óptimo para la relación diámetro/altura de los envases de 500 ml, es igual a la unidad, y ocurre cuando el diámetro  $D_{\text{óptimo}} = 8.6$  cm es igual a la altura  $h_{\text{óptima}} = 8.6$  cm; asimismo, el peso óptimo ( $W_{\text{óptimo}}$ ) que

corresponde a este diámetro y altura, que da el menor peso de material pet para los envases de 500 ml es:  $W_{\text{óptimo}} = 14.6$  g. Ahora, si se comparan los valores óptimos encontrados, con los valores correspondientes que se utilizan actualmente en la elaboración de estos envases, se tiene:  $D_{\text{actual}} = 6.5$  cm,  $h_{\text{actual}} = 15.1$  cm,  $W_{\text{actual}} = 15.6$  g, se puede ver entonces que el peso de material pet ahorrado por cada envase de 500 ml es  $(W_{\text{actual}} - W_{\text{óptimo}}) = (15.6 - 14.6) = 1.0$  g.

Este resultado de 1.0 g es el valor máximo de material pet ahorrado por cada envase de 500 ml, obtenido mediante este modelo de optimización volumétrica, y muestra que se puede ahorrar también 0.5 g, a 1 g, eligiendo de forma conveniente el diámetro y la altura del envase, de tal manera que sea económico y atractivo. Para la elección del diámetro y la altura convenientes, se puede utilizar la ecuación matemática del modelo o también se puede hacer la elección en forma gráfica (ver Figura 7, Figura 8 y Figura 9), teniendo como parámetro la capacidad del envase de 500 ml. La relación de este resultado con el impacto en la industria de bebidas lo se puede apreciar desde el punto de vista de los costos de fabricación; para lo cual, si se multiplica el valor de 1.0 g de material pet ahorrado por cada envase por el nivel de 1'800,000 botellas de 500 ml vendidas mensualmente, se obtiene un ahorro de US\$ 152,864 al año, lo cual justifica que el modelo propuesto se pueda implementar; sin embargo, al igual que para los envases de 1,500 ml y 1,000 ml, existen restricciones que se debe de considerar para saber hasta qué punto se puede reducir el peso del envase sin perjudicar su calidad ni la estética del envase. Las restricciones a considerar son las mismas que se ha considerado para los envases de 1,500 ml y 1,000 ml. Ramírez (2002, p. 28), en su tesis Estándares de Calidad para el proceso de producción de Botellas pet no retornables, encontró que la calidad del envase está dada por el espesor del envase el cual le da su alta resistencia mecánica y baja permeabilidad a gases y vapores; asimismo, indica que el diseño del envase debe ser atractivo, ya que representa la imagen que desea dar el fabricante al cliente, sin embargo, también indica que lo estético no debe comprometer de ninguna manera la permeabilidad ni la resistencia mecánica del envase (Ramírez, 2002, p. 35). Por otro lado, también indica, que el nivel de uniformidad del envase

depende de la relación de estirado u orientación biaxial durante el soplado de la botella (Lontos & Gregoriou, 2019) y recomienda una relación de estirado longitudinal de 2.5 y una relación de estirado de superficie cuatro veces mayor que el estirado longitudinal; estas relaciones de estirado están dentro de los rangos considerados en los datos y resultados de la presente investigación. La elección final depende de la forma propia de la botella y de las propiedades físicas requeridas.

Otros trabajos de investigación proponen diferentes formas de optimización en la fabricación de envases pet, las cuales han sido investigadas por diferentes autores, como por ejemplo: (Chambi, 2021) quien diseñó y utilizó una válvula reguladora de la presión de aire en el pre-soplado de los envases, con lo que logró optimizar el procedimiento de soplado de las botellas pet, al obtener un estiramiento uniforme del material y como resultado botellas con pared más delgada, logrando disminuir hasta en 32.2% el material pet empleado para la fabricación de la botella, aunque al obtener botellas con paredes delgadas, reduce la durabilidad de las bebidas carbonatadas, ya que el anhídrido carbónico que contiene, se pierde a través de las paredes del envase, de manera más rápida. Los hallazgos encontrados en el estudio de Chambi (2021) guardan relación con los del presente trabajo, ya que demuestran que si durante el proceso de elaboración de la botella, se obtienen paredes delgadas en el envase, entonces la durabilidad de las bebidas carbonatadas se reduce, ya que mientras más delgada es la pared del envase, es mayor su permeabilidad y entonces el CO<sub>2</sub> contenido dentro de la bebida se pierde más rápido y a través de la pared del envase y la botella se hace se “desinfla”; sin embargo, en la presente investigación se ha considerado el espesor del envase constante, con lo cual se asegura la resistencia mecánica del envase y su calidad.

Otra forma de optimizar el proceso de fabricación de las botellas pet es como lo hizo el investigador Yugsi (2021), quien utilizó un software de ingeniería para el diseño y manufactura de los moldes de las botellas, mejorando la tecnología y el proceso de fabricación de los moldes de las botellas pet, con lo que logró optimizar el proceso de soplado o fabricación de los envases pet. Por otro lado, Fernández y Palacios (2020) utilizaron materiales alternativos en

reemplazo del pet, como por ejemplo el ácido poliláctico (PLA) que proviene de residuos vegetales y se degrada en 80 días; también Argomedo (2019) pudo mejorar y optimizar el proceso de llenado de las botellas pet, mediante el uso de válvulas independientes de llenado, reduciendo los tiempos programados para el cambio de estas válvulas y eliminando los tiempos de parada.

Los autores Gaspar et al. (2022) en su trabajo de investigación *Optimization of Polymer Processing: A Review (Part II-Molding Technologies)* concluyen que la aplicación de técnicas de optimización para mejorar el rendimiento de las tecnologías de procesado de polímeros tiene una gran consecuencia práctica, ya que puede suponer un importante ahorro de materiales y recursos energéticos, ayudar a los planes de reciclaje y generar productos con mejores propiedades, lo cual concuerda con nuestros objetivos aunque las técnicas de optimización son variadas. Asimismo, para el llenado de botellas en caliente, Yuan et al. (2018) realizaron un análisis y pruebas de presión interna de botellas que se utilizan para llenado en caliente, con lo cual se mejoró la funcionalidad de las botellas cuando luego de ser llenadas, son sometidas a presión o vacío durante alguna parte de la cadena de suministro.

También los autores Michels et al. (2019) en su trabajo de investigación *An integrative simulation concept for extrusion blow molded plastic bottles*, afirman que, para optimizar el rendimiento del producto de las botellas de plástico moldeadas por soplado con un peso mínimo, el uso de la ingeniería asistida por ordenador se ha vuelto cada vez más importante en los últimos años. Las pruebas de carga superior basadas en la simulación, las pruebas de presión de rotura o las pruebas de caída son ya un parte de la técnica. Varias propiedades del producto final, como el comportamiento de la deformación, son predecibles. Sin embargo, si hay que determinar con precisión un valor específico, como la carga máxima o la altura máxima de caída, la simulación llega a sus límites de caída con una precisión satisfactoria, por lo que sigue siendo necesario realizar costosas series de prototipos. Se concluye entonces, que aunque se logren los resultados esperados utilizando técnicas de modelamiento, simulación y optimización, siempre será necesario realizar las pruebas en una situación real, lo cual concuerda con el presente trabajo de investigación.

En todos estos estudios, el problema de optimización consiste en minimizar o maximizar aquella función objetivo sujeta a algunas restricciones, y de esta forma, resolver ese problema de optimización mediante un enfoque de economía circular para impactar en la sostenibilidad.

Para la Industria del Pet y otros sectores de la industria plástica, el problema de reducción de peso de los envases, sigue siendo un tema de prioridad. Algunos creen que el límite de la reducción de peso de las botellas pet está cerca. Desde algunos años, reducir el espesor de pared de los envases, ha sido uno de los objetivos de la industria, sobre todo en envases pet desechables destinados para el embotellado de agua sin gas; en cambio, el espesor de pared no se ha reducido en forma considerable para los envases retornables y bebidas carbonatadas, y al parecer esta tendencia no se va a incrementar, ya que una disminución en el espesor de este tipo de envases, acortaría la vida o duración del producto terminado.

Una botella de medio litro pet para agua sin gas, pesa 8,7 g, y este valor podría reducirse hasta los 7,0 ó 6,5 g en los siguientes años. Sin embargo, los productores de botellas deben adoptar acciones en este sentido para lograr la conformidad de los consumidores en el uso de botellas de este tipo (Wiese, 2018).

Al analizar los costos de los envases soplados en el proceso de producción, se encuentra, que en orden de prioridad, los costos de materia prima son los principales, luego los costos de energía, los costos de producción y por último, los costos de inversión en equipos (Chambi, 2021). El costo de equipos y maquinaria tiene poca relevancia en comparación con los demás costos. Para reducir los costos, el ahorro de energía es un factor relevante y en ello se ha trabajado de manera permanente en la industria. Mientras que hace algunos años eran necesarios 35 bar de presión para soplar una preforma, hoy en día se necesitan sólo 20 o 25 bar. Y la tendencia continúa bajando.

El Pet es el material preferido para la elaboración de botellas en la industria de bebidas, debido a sus propiedades favorables de resistencia mecánica y a su menor precio, comparado con otros materiales. Por ejemplo, se ha comprobado

que el material PLA no es una alternativa para la fabricación de botellas de bebida, por su alto precio y por no tener las cualidades necesarias. Otro material, es el Bio-PET, con el cual, a partir de fuentes renovables, se busca generar PET. Pero, se puede considerar que el reciclado de botellas es más relevante, ya que tiene el potencial de reducir los costos en el sector de producción de botellas. El horizonte óptimo es mantener el reciclado de “botella a botella”, aunque no como una opción única. Hay otras opciones como el reciclado de botellas para producir fibras, que se debe tener en cuenta (Wiese, 2018).

Usando menos material, se contribuirá responsablemente con el consumo de los envases Pet y la reducción de peso de las botellas de Pet será un objetivo permanente, y conllevará a reducir los costos de fabricación y los costos de distribución de los productos fabricados con este material. El uso de menor cantidad de material, ayuda a que en la fabricación de la botella se reduzca el consumo de energía; asimismo, facilita el reciclado de las botellas. Sin embargo, al disminuir el peso de las botellas, se debe considerar algunos aspectos como la vida útil del producto terminado, las nuevas condiciones en la línea producción y en la cadena de suministro y la aceptación del consumidor ante una botella de menor espesor. También se han logrado algunas mejoras en el diseño del cuerpo de la preforma, lo que se ha traducido en un mejor estiramiento durante el proceso de soplado de la botella, lo cual, da como resultado botellas con mayor capacidad de llenado, aunque con menor espesor. Esto es notorio sobre todo en las botellas no retornables que se utilizan para el llenado de agua sin gas, donde actualmente se usan botellas de medio litro de 8,7 g y que podrían reducirse a 6,5 g en los próximos años (Wiese, 2018).

En el caso de las botellas para bebidas carbonatadas, la disminución del peso no ha sido tan considerable, ya que al contener CO<sub>2</sub>, los requerimientos para las botellas son mayores. En este caso, los fabricantes deben ser cuidadosos en cuanto a la aprobación del consumidor, ya que las botellas de menor espesor podrían perjudicar la calidad del producto, sobre todo en botellas para bebidas carbonatadas. Sin embargo, se debe seguir dando importancia a los beneficios para el medioambiente que se obtienen por el uso de envases con menor espesor, y por tanto, con menos material por botella, de modo que se logre

mejorar la percepción del consumidor, impulsando el consumo responsable de botellas Pet con el uso de botellas que tengan un menor peso del material.

En los últimos años el estudio y la aplicación del modelamiento, la simulación y optimización en las botellas pet se ha hecho analizando varias de sus propiedades. Por ejemplo, el estudio sobre la tensión en las botellas de PET está centrada en el proceso de moldeo por inyección y en la preparación de los materiales. Ge-Zhang et al. (2022a) redujeron la tensión principal máxima de la superficie, la tensión principal máxima global y la energía de deformación elástica total del fondo de la botella se reducen en un 72%, 71% y 61%, respectivamente, mediante simulación numérica y análisis de elementos finitos. Alzanki & Jafar, (2019) utilizaron un modelo predictivo desarrollado mediante redes neuronales para minimizar el peso de las preformas en el el proceso de Stretch-Blow Molding (SBM) o moldeo por estiramiento y soplado, que se usa para la producción de botellas pet; el modelo se combinó para calcular automáticamente el peso más bajo de la preforma que puede utilizarse proporcionando una distribución uniforme del grosor de las paredes para un diseño de botella de 330 ml.

En otro artículo de estudio Ge-Zhang et al. (20022b) hicieron una simulación por ordenador de la estructura del fondo de las botellas de bebidas carbonatadas de pet basada en la optimización del doble ajuste manual y automático. Para ello utilizaron el software de simulación SolidWorks con el que construyeron un modelo estructural del fondo de las botellas pet mediante el comando de SolidWorks "shell-pulling", con lo que hicieron que todas las partes de la botella se acoplaran suavemente. Se comparó la influencia de la estructura geométrica del modelo en las propiedades mecánicas del fondo de la botella, partiendo de un grosor uniforme del fondo de la botella de 1 mm el cual se mantuvo en el mismo valor promedio y además, en comparación con el fondo de la botella original, la tensión principal máxima total y la energía de deformación elástica total en el fondo de la botella después de la doble optimización manual-automática disminuyeron en un 69% y un 40%, respectivamente.

Thongkaew & Naemsai (2020) utilizando el método de los elementos finitos (MEF) estudiaron las propiedades mecánicas de las botellas como la deformación

y la tensión máximas que pueden utilizarse para evaluar el grosor óptimo y el rendimiento. De los resultados de la simulación obtuvieron que para una botella de 6 litros, que permite mantener su tensión máxima por debajo del valor crítico, su espesor es de 0,45 mm. Hopmann & Twardowski (2020) estudiaron la relación entre la viscosidad del material pet y la deformación del tereftalato de polietileno (Pet) en el proceso de moldeo por estirado y soplado, donde concluyeron que la forma óptima del moldeo por soplado y estirado es un proceso en el que las preformas se estiran tanto en dirección circunferencial como axial mientras se soplan en un molde, es decir, un estiramiento biaxial.

Liangxian et al. (2020) utilizaron un software para realizar una simulación del proceso de moldeo por estirado-soplado de botellas de pet; para optimizar la combinación de los parámetros del proceso se utilizó el método de ensayo ortogonal interactivo. Se logró una combinación de parámetros de proceso óptima cuando la velocidad de estiramiento se estableció en 1,6 m/s, el tiempo de retardo en 0,06 s, la temperatura de calentamiento en 110 °C y la presión de presoplado en 0,7 MPa. Nosachova & Glushchenko (2021) hicieron un estudio para optimizar el espesor de pared de una preforma necesario para fabricar un objeto termoplástico en un proceso de moldeo por soplado, con un enfoque de ingeniería. Se determinó que el tamaño más aceptable del diámetro para el objeto termoplástico debe seleccionarse dentro del 30% del diámetro del producto final.

Koloskov et al. (2021) demostraron mediante su investigación que la metodología de diseño utilizando el software QForm Extrusion para la modelización del proceso de extrusión semicontinua de perfiles huecos de aleación de aluminio, puede utilizarse con éxito para preparar la producción de prensado y puede reducir el tiempo necesario para dominar la tecnología de extrusión de perfiles de aleación de aluminio. Sin embargo, la mayoría de los estudios se refieren a las características de los materiales de pet en sí, sin considerar la estructura geométrica de los productos.

## VI. CONCLUSIONES

**Primero.** En relación al objetivo específico 1, determinar la relación diámetro/altura óptima de las botellas pet de 1,500 ml, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico, se concluye, que la relación diámetro/altura óptima ocurre cuando el diámetro  $D_{\text{óptimo}} = 12.4$  cm es igual a la altura  $h_{\text{óptima}} = 12.4$  cm; y más importante aún, el peso óptimo del envase es:  $W_{\text{óptimo}} = 30.3$  g, es decir, 3.4 g o 10% menos de lo que pesa el envase actual de 1,500 ml y el ahorro generado será de US\$ 111,978 al año para un nivel de producción de 1'000,000 envases/mes. Más aún, si por consideraciones estéticas, no se desea trabajar con los valores de diámetro óptimo y altura óptima hallados, entonces se pueden elegir valores intermedios de diámetro y altura, utilizando la ecuación del modelo de optimización volumétrico, o los gráficos de dicha ecuación, con lo que se podrán conseguir 1 g, 2 g, y hasta 3 g de ahorro de material pet por cada envase.

**Segundo.** En relación al objetivo específico 2, determinar la relación diámetro/altura óptima de las botellas pet de 1,000 ml, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico, se concluye, que la relación diámetro/altura óptima ocurre cuando el diámetro  $D_{\text{óptimo}} = 10.8$  cm es igual a la altura  $h_{\text{óptima}} = 10.8$  cm; y más importante aún, el peso óptimo del envase es:  $W_{\text{óptimo}} = 22.4$  g, es decir, 1.7 g o 7% menos de lo que pesa el envase actual de 1,000 ml y el ahorro generado será de US\$ 48,367 al año para un nivel de producción de 700,000 envases/mes. Más aún, si por consideraciones estéticas, no se desea trabajar con los valores de diámetro óptimo y altura óptima hallados, entonces se pueden elegir valores intermedios de diámetro y altura, utilizando la ecuación del modelo de optimización volumétrico, o los gráficos de dicha ecuación, con lo que se podrán conseguir 0.5 g, 1 g, y hasta 1.5 g de ahorro de material pet por cada envase.

**Tercero.** En relación al objetivo específico 3, determinar la relación diámetro/altura óptima de las botellas pet de 500 ml, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico, se concluye, que la relación diámetro/altura óptima ocurre cuando el diámetro  $D_{\text{óptimo}} = 8.6$  cm

es igual a la altura  $h_{\text{óptima}} = 8.6$  cm; y más importante aún, el peso óptimo del envase es:  $W_{\text{óptimo}} = 14.6$  g, es decir, 1.0 g o 6.4% menos de lo que pesa el envase actual de 500 ml y el ahorro generado será de US\$ 152,864 al año para un nivel de producción de 1'800,000 envases/mes. Más aún, si por consideraciones estéticas, no se desea trabajar con los valores de diámetro óptimo y altura óptima hallados, entonces se pueden elegir valores intermedios de diámetro y altura, utilizando la ecuación del modelo de optimización volumétrico, o los gráficos de dicha ecuación, con lo que se podrán conseguir 0.5 g y hasta 1.0 g de ahorro de material pet por cada envase.

**Cuarto.** Se concluye que el modelo matemático de optimización volumétrico propuesto optimiza la fabricación de envases pet y trae como consecuencia que el proceso de fabricación de las botellas sea más eficiente, económico y productivo, ya que reduce el peso del material pet utilizado en el envase, manteniendo su calidad, dando también una mejor presentación del envase en el mercado, ya que se tiene un rango apropiado para elegir las dimensiones y la forma del envase.

**Quinto.** Se concluye que el modelo matemático de optimización volumétrico tiene un alto impacto en la industria de envases, ya que puede generar un ahorro considerable de material de hasta 10% y por lo tanto reducir los costos de fabricación, lo cual representa también una reducción en el impacto ambiental o huella plástica generada por los residuos de botellas pet que se desechan y terminan contaminando la tierra y los mares.

**Sexto.** Asimismo, se concluye que todo el análisis hecho en el presente trabajo es aplicable para todo tipo, forma y material de envase, ya sean botellas de vidrio, botellas de plástico, bidones de cualquier material, cajas, etc., para lo cual sólo bastará encontrar la función objetivo:  $V_{\text{mat}} = f(x_1, x_2, x_3, \dots)$ , donde  $V_{\text{mat}}$  es la cantidad de material en el envase (función objetivo que se quiere minimizar), y  $x_1, x_2, x_3, \dots$ , son las dimensiones del envase a considerar (variables de decisión), que pueden estar sujetas a ciertas condiciones o restricciones.

## VII.RECOMENDACIONES

**Primero.** El modelo de optimización desarrollado, para la fabricación de las botellas pet ha demostrado ser eficiente, para las capacidades de envase dentro del rango de 500 ml a 1,500 ml en el ámbito teórico; por ello **se recomienda** que este estudio se complemente a través de una postprueba aplicativa, en la que se mida en una situación real y entre otras cosas, la reducción del peso y la conservación de las propiedades mecánicas y de barrera de los envases, variando sus dimensiones (altura y diámetro), pero manteniendo su espesor, para una capacidad de envase determinada.

**Segundo.** **Se recomienda** y se invita a profundizar este tipo de investigación en la optimización de la fabricación de envases, aplicando un modelo de optimización para las diferentes formas de envases y de diferentes materiales, con lo cual se podrán obtener reducciones en los pesos de los envases, reducciones en los costos de fabricación y también una reducción en el impacto ambiental, ya que se reducirán las toneladas de envases y materiales que son desechados al ambiente.

**Tercero.** **Se recomienda** tener en cuenta que hoy día, uno de los grandes retos para la humanidad, es la sostenibilidad o desarrollo sostenible, asociados a la economía de los procesos y al problema de impacto ambiental, de tal forma que, desde una perspectiva holística o integral, se puedan diseñar procesos limpios y de alta rentabilidad, implementándolos bajo el concepto de economía circular mediante el mejor aprovechamiento de los recursos. Finalmente, la optimización está presente en el día a día en la mayor parte de las actividades que realiza el ser humano.

## REFERENCIAS

- Alzanki, T. H., & Jafar, M. M. (2019). Parameter Prediction of Stretch-Blow Molding Process of PET Using Neural Networks. *Journal of Software Engineering and Applications*, 12(07), 278. [https://www.scirp.org/html/2-9302661\\_94060.htm](https://www.scirp.org/html/2-9302661_94060.htm)
- Arias Gonzáles, J. L. (2020). *Proyecto de tesis: guía para la elaboración*. Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2020-05577. [http://repositorio.concytec.gob.pe/bitstream/20.500.12390/2236/1/AriasGonzales\\_ProyectoDeTesis\\_libro.pdf](http://repositorio.concytec.gob.pe/bitstream/20.500.12390/2236/1/AriasGonzales_ProyectoDeTesis_libro.pdf)
- Arias Gonzáles, J. L., & Covinos Gallardo, M. (2021). *Diseño y metodología de la investigación*. Editorial Enfoques Consulting EIRL. <http://hdl.handle.net/20.500.12390/2260>
- Argomedo Anticona, E. R., & Nureña Pretel, N. G. (2019). Diseño de un sistema de independización de las válvulas de llenado para optimizar la productividad del proceso de envasado de la línea número cinco del área de pet en la corporación Arca Continental Lindley, Santa Rosa–Trujillo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/43016>
- Arto, M. A. (20 de Julio de 2022). *Reducción de peso en botellas de PET: hacia un ahorro integral*. The Food Tech. <https://thefoodtech.com/historico/reduccion-de-peso-en-botellas-de-pet-hacia-un-ahorro-integral/>
- Bauce, G. J., Córdova, M. A., & Avila, A. V. (2018). Operacionalización de variables. *Revista del Instituto Nacional de Higiene "Rafael Rangel"*, 49(2), 43. [https://revista.vps.co.ve/wp-content/uploads/2020/12/Revista-cientifica\\_vol\\_49\\_2.pdf#page=52](https://revista.vps.co.ve/wp-content/uploads/2020/12/Revista-cientifica_vol_49_2.pdf#page=52)
- Calixto Cabeza, J. J. (2021). *Software para la optimización de cortes de hojalata en la fabricación de envases en el área de producción de la empresa Industria de Estampados Metálicos S.A.C- IDEMSAC*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/82637>

- Carvalho Machado, J. (2019). *UM ESTUDO SOBRE MÁXIMOS E MÍNIMOS APLICADOS A PROBLEMAS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA E OTIMIZAÇÃO DE ÁREAS*. Repositorio Institucional do IF Goiano. [https://repositorio.ifgoiano.edu.br/bitstream/prefix/683/1/tcc\\_Jaqueline%20Machado.pdf](https://repositorio.ifgoiano.edu.br/bitstream/prefix/683/1/tcc_Jaqueline%20Machado.pdf)
- Chambi Zubileta, P. E. (2021). *Diseño de válvula reguladora de caudal de aire para la optimización del sistema de soplado de botellas P.E.T. en máquinas sopladoras semiautomáticas de dos cavidades*. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/15231>
- Coluccio Leskow, E. (15 de Julio de 2021). *Volumen*. Concepto. Editorial Etecé. Recuperado el 05 de Julio de 2022 de <https://concepto.de/volumen/>
- Cruz Mora, E. C., Ortiz Hernández, J., & Ortiz Viáfara. (2017). *Impacto financiero generado por el reciclaje de las botellas PET en la empresa Enka de Colombia* (Doctoral dissertation, Corporación Universitaria Minuto de Dios). <http://hdl.handle.net/10656/5401>
- Esumer, I. U. (2018). *Empaques activos e inteligentes*. Institución Universitaria. <https://repositorio.esumer.edu.co/jspui/bitstream/esumer/1904/1/EMPAQUE%20ACTIVOS.pdf>
- Fernández Villaverde, C. E., & Palacios Pachas, M. R. (2020). *Estudio de prefactibilidad para la instalación de una planta de preformas biodegradables para botellas con agua*. <https://repositorio.ulima.edu.pe/handle/20.500.12724/12316>
- Gaspar-Cunha, A., Covas, J. A., & Sikora, J. (2022). Optimization of Polymer Processing: A Review (Part II-Molding Technologies). *Materials*, 15(3), 1138. <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/3/1138>
- Ge-Zhang, S., Song, M., Huang, Z., Li, M., & Mu, L. (2022a). Comparison and Optimization: Research on the Structure of the PET Bottle Bottom Based on

the Finite Element Method. *Polymers*, 14(15), 3174.  
<https://www.mdpi.com/2073-4360/14/15/3174>

Ge-Zhang, S., Chen, X., Zhu, H., Song, Y., Ding, Y., & Cui, J. (2022b). Computer Simulation of Polyethylene Terephthalate Carbonated Beverage Bottle Bottom Structure Based on Manual–Automatic Double-Adjustment Optimization. *Polymers*, 14(14), 2845. <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/14/2845>

Heizer, J., Render, B., & Parra, J. L. M. (2007). *Dirección de la producción y de operaciones: decisiones estratégicas* (No. TS155. H45 2007.). Madrid: Pearson educación.  
[https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as\\_sdt=0%2C5&q=Direcci%C3%B3n+de+la+producci%C3%B3n+y+de+operaciones+Decisiones+estrat%C3%A9gicas%2C+pearson&btnG=](https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Direcci%C3%B3n+de+la+producci%C3%B3n+y+de+operaciones+Decisiones+estrat%C3%A9gicas%2C+pearson&btnG=)

Hopmann, C., Twardowski, B. (2018). *Simulative Preform Optimization for Improved Topload Behavior of PET-Bottles Manufactured in the Two Stage Stretch Blow Molding Process*. Vol. 2018-May. N.p., 2018. Print.  
<https://publications.rwth-aachen.de/record/754748>

Hopmann, C., Twardowski, B., & Bakir, C. (2020). Limitations of Reptation Theory for Modeling the Stress-Dependent Rheological Behavior of Polyethylene Terephthalate Above the Glass-Transition Temperature. *Polymer Engineering & Science*, 60(4), 765-772.. <https://doi.org/10.1002/pen.25334>

Ivanov, D., Tsipoulanidis, A., & Schönberger, J. (2019). *Global supply chain and operations management: A decision-oriented introduction to the creation of value* (Vol. 2). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.  
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-72331-6>

Jacobs, F. R., & Chase, R. B. (2018). *Operations and supply chain management*. Fifteenth Edition. New York, NY: McGraw-Hill/Irwin.  
[http://thuvien.thanglong.edu.vn:8080/dspace/bitstream/TLU-123456789/3591/1/TVS.002761\\_Operations%20and%20supply%20chain%20management\\_1.pdf](http://thuvien.thanglong.edu.vn:8080/dspace/bitstream/TLU-123456789/3591/1/TVS.002761_Operations%20and%20supply%20chain%20management_1.pdf)

- Koloskov, S., Sidelnikov, S., & Voroshilov, D. (2021). Modeling process of semi-continuous extrusion of hollow 6063 aluminum alloy profiles using QForm extrusion. In *Solid State Phenomena* (Vol. 316, pp. 288-294). Trans Tech Publications Ltd. <https://www.scientific.net/SSP.316.288>
- Kruszelnicka, W., Bałdowska-Witos, P., Flizikowski, J., Tomporowski, A., Ropińska, P., & Ignaczak, P. (2018). The blowing process of a pet bottles. *Machines. Technologies. Materials.*, 12(8), 313-315. <https://stumejournals.com/journals/mtm/2018/8/313>
- Liangxian, L. I. U., Zhihua, F. E. N. G., Chunxue, H. U., & Jinan, G. E. (2020). Optimization Design of PET Bottle Stretch Blow Molding Based on Orthogonal Test. *China Plastics*, 34(6), 73. <https://www.plaschina.com.cn/EN/abstract/abstract2895.shtml>
- Lontos, A., & Gregoriou, A. (2019). The effect of the deformation rate on the wall thickness of 1.5 LT PET bottle during ISBM (Injection Stretch Blow Molding) process. *Procedia CIRP*, 81, 1307-1312. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827119306328?ref=pdf\\_download&fr=RR-2&rr=7375bc73bb8b952b](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827119306328?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=7375bc73bb8b952b)
- Luo, Y. M., Chevalier, L., Monteiro, E., Yan, S., & Menary, G. (2020). Simulation of the Injection Stretch Blow Molding Process: An Anisotropic Visco-Hyperelastic Model for Polyethylene Terephthalate Behavior. *Polymer Engineering & Science*, 60(4), 823-831. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pen.25341>
- Michels, P., Grommes, D., Oeckerath, A., Reith, D., & Bruch, O. (2019). An integrative simulation concept for extrusion blow molded plastic bottles. *Finite Elements in Analysis and Design*, 164, 69-78. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168874X19300411>
- Niño Rojas, V. M. (2019). *Metodología de la investigación: diseño, ejecución e informe*. Ediciones de la U. <http://www.ebooks7-24.com/?il=9546>

- Nisticò, R. (2020). Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry. *Polymer Testing*, 90, 106707. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142941820310333>
- Nosachova, J., & Glushchenko, M. (2021, May). Evaluating the Wall Thickness of a Blow Molding Billet. In *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV: Proceedings of the 4th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2021, June 8–11, 2021, Lviv, Ukraine–Volume 2: Mechanical and Chemical Engineering* (p. 166). Springer Nature.
- Ñaupas Paitán, H., Palacios Vileta, J. J., Romero Delgado, H. E., Valdivia Dueñas, M. R. (2018). *Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis*. Ediciones de la U. <http://www.ebooks7-24.com/?il=8046>
- Ondarse Álvarez, D. (15 de Julio de 2021). *Densidad*. Concepto. Editorial Etecé. Recuperado el 05 de Julio de 2022 de <https://concepto.de/densidad/>
- Rachelli, J., & Christo, P. D. (2021). MÁXIMOS E MÍNIMOS DE FUNÇÕES: UM ESTUDO COM BASE EM PROBLEMAS HISTÓRICOS. *Boletim Cearense de Educação e História da Matemática–Volume 08, Número 24, 65–83, 2021*. <https://revistas.uece.br/index.php/BOCEHM/article/view/5359/4751>
- Ramírez Figueroa, V. F. (2002). Estándares de calidad para el proceso de producción de botellas pet no retornables. [https://web.archive.org/web/20180520034638id\\_/http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/8138/1/ramirez\\_fv.pdf](https://web.archive.org/web/20180520034638id_/http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/8138/1/ramirez_fv.pdf)
- Rebaza, L. U. M. T. (2020). Aprovechamiento de residuos sólidos plásticos PET para la construcción de una habitación ecológica en Tacna. *Arquitek*, (18), 10-18. <https://revistas.upt.edu.pe/ojs/index.php/arquitek/article/view/435>
- Residuos Profesional (25 de Marzo de 2020). *PRIMERA METODOLOGÍA PARA MEDIR LA HUELLA PLÁSTICA DE LAS EMPRESAS*. Recuperado el 02 de Junio de 2020, de <https://www.residuosprofesional.com/metodologia-medir->

[huella-plastica/](#)

Sampieri, R. H. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Editorial McGraw-Hill Interamericana S.A.  
[http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales de consulta/Drogas de Abuso/Articulos/SampieriLasRutas.pdf](http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales_de_consulta/Drogas_de_Abuso/Articulos/SampieriLasRutas.pdf)

Santamaría, M. (2019). *Mediciones e instrumentación*. Editorial Alfaomega.  
<https://www.alphaeditorialcloud.com/library/publication/mediciones-e-instrumentacion-1>

Surjet (14 de Diciembre de 2021a) *Tendencias de futuro en el uso de materiales para envases en el sector del packaging*. SURJET SUMINISTROS TÉCNICOS DEL SUR SL. Recuperado el 02 de Agosto de 2022.  
<https://www.surjet.com/tendencias-packaging-2022/>

Surjet (14 de Diciembre de 2021b). *Modelling & Simulation - Quick Guide*. Tutorialspoint. Recuperado el 02 de Agosto de 2022.  
[https://www.tutorialspoint.com/modelling\\_and\\_simulation/modelling\\_and\\_simulation\\_quick\\_guide.htm](https://www.tutorialspoint.com/modelling_and_simulation/modelling_and_simulation_quick_guide.htm)

Tan, Z. Q., Rosli, N., & Oktaviandri, M. (2018, March). Simulation on Effect of Preform Diameter in Injection Stretch Blow Molding. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 319, No. 1, p. 012053). IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/319/1/012053/meta>

Thongkaew, K., & Naemsai, T. (2020). Mechanical Properties and Cost-Minimized Design of 6-liter PET Bottle Using Finite Element Method. *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)*, 17(6), 579-587.  
<https://wjst.wu.ac.th/index.php/wjst/article/view/6478>

Torres-Rodríguez, A. A., & Monroy-Muñoz, J. I. (2020). *El problema de la definición del Problema de Investigación*. *Boletín Científico De La Escuela Superior Atotonilco De Tula*, 7(13), 10-15.  
<https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/atotonilco/article/view/526>

- Vásquez, J. P. R., Cárdenas, D. C., Carrillo, M. G. G., & Rosero, C. H. S. (2015). Modelo de programación lineal para planeación de requerimiento de materiales. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 28(2).  
<http://200.10.150.204/index.php/tecnologica/article/view/322>
- Wiese, A. (2018). *Botellas de PET: El peso no lo es todo*. Tecnología del Plástico, CLF Injection Molding Solutions. Obtenido de  
<http://www.plastico.com/temas/Botellas-de-PET,-El-peso-no-lo-es-todo+3088615>
- Yuan, Jay Z., Zhang, Sean X., Haynes, Clinton A. (2018). *Any Buldging or Paneling Issues for Your Packages? Introducing "Bipath," an Effective Package and Process Design Pathway for Pressure and Vacuum Management*. Vol. 2018-May. N.p., 2018. Print.  
<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85072969444&origin=resultslist&sort=cp->
- Yugsi Llano, D. J. (2021). *Tecnología de fabricación de moldes para optimizar el proceso de moldeo por soplado de envases PET, en una planta embotelladora de bebidas* (Master's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Maestría en Mecánica Mención Manufactura).  
<http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/31993>
- Zavaleta, Javier (13 de Julio de 2022). *Tendencias y Retos para el packaging del presente y del futuro*. EQUIPACK. Recuperado el 02 de Agosto de 2022.  
<https://www.equipack.es/noticias/20220713/tendencias-y-retos-packaging-presente-y-futuro-javier-zabaleta-itene>
- Zhang, R., Ma, X., Shen, X., Zhai, Y., Zhang, T., Ji, C., & Hong, J. (2020). PET bottles recycling in China: An LCA coupled with LCC case study of blanket production made of waste PET bottles. *Journal of environmental management*, 260, 110062.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479719317803>

## **ANEXOS**

**Tabla 4.** Matriz de consistencia

Título: Optimización en la elaboración de botellas pet en una planta embotelladora y su impacto en la industria de bebidas y el medio ambiente					
PROBLEMAS	OBJETIVOS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
<p><b>Problema General</b> ¿Cuál es la relación óptima entre las Dimensiones y el Volumen de las botellas Pet, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico?</p>	<p><b>Objetivo General</b> Determinar la relación óptima entre las Dimensiones y el Volumen de las botellas Pet, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico.</p>	Dimensiones de la botella	Diámetro	Valor en centímetros	<p><b>Tipo y Diseño de Investigación</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de investigación: Aplicada</li> <li>• Enfoque: Cuantitativo</li> <li>• Nivel: Descriptivo Explicativo</li> <li>• Diseño: No experimental</li> </ul> <p><b>Población, muestra, unidad de estudio</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Población: Envases Pet</li> <li>• Muestra: Botellas Pet de 1500 ml, 1000 ml y 500 ml</li> <li>• Muestreo: Se consideraron los envases o botellas con formato más representativo en el mercado.</li> </ul> <p><b>Técnicas e instrumentos de recolección de datos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Técnica: Documentación, Observación</li> <li>• Instrumento: Ficha de documentación, Ficha de observación.</li> </ul> <p><b>Método de análisis de datos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se usó un modelo matemático de optimización volumétrico.</li> </ul>
<p><b>Problema Específico 1</b> ¿Cuál es la relación diámetro/altura óptima de las botellas pet de 1500 ml, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico?</p>	<p><b>Objetivo Específico 1</b> Determinar la relación diámetro/altura óptima de las botellas pet de 1500 ml, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico.</p>		Altura	Valor en centímetros	
<p><b>Problema Específico 2</b> ¿Cuál es la relación diámetro/altura óptima de las botellas pet de 1000 ml, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico?</p>	<p><b>Objetivo Específico 2</b> Determinar la relación diámetro/altura óptima de las botellas pet de 1000 ml, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico.</p>		Volumen	Valor en centímetros cúbicos o mililitros	
<p><b>Problema Específico 3</b> ¿Cuál es la relación diámetro/altura óptima de las botellas pet de 500 ml, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico?</p>	<p><b>Objetivo Específico 3</b> Determinar la relación diámetro/altura óptima de las botellas pet de 500 ml, elaboradas en una planta embotelladora, aplicando un modelo de optimización volumétrico.</p>				

**Tabla 5.** *Matriz de operacionalización de variables*

<b>Título: Optimización en la elaboración de botellas pet en una planta embotelladora y su impacto en la industria de bebidas y el medio ambiente</b>					
<b>VARIABLES DE ESTUDIO</b>	<b>DEFINICIÓN CONCEPTUAL</b>	<b>DEFINICIÓN OPERACIONAL</b>	<b>DIMENSIÓN</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>TIPO</b>
Dimensiones de la botella	<p>Dimensión, es el nombre que se le da a las magnitudes o cantidades físicas susceptibles de ser medidas, como: longitud, masa, tiempo, etc.</p> <p>Unidad: es la medida de la dimensión. Por ejemplo: pie, metro, y milla son unidades de la dimensión longitud. Santamaría (2019)</p>	<p>Para medir y evaluar las dimensiones del envase, se utilizará un equipo o instrumento de medición en el cual se colocará el envase o la botella y por comparación mediante la indicación de las unidades del instrumento se tomará el valor de la medida, tanto de la Altura, Diámetro y Espesor del envase.</p>	Altura	Valor en centímetros	Independiente Continua Razón
			Diámetro	Valor en centímetros	Independiente Continua Razón
	<p>El volumen es una magnitud de tipo escalar, definida como la extensión de las tres dimensiones de un objeto, siendo estas tres dimensiones, su longitud, ancho y altura. En otras palabras, el volumen es la medida del espacio que ocupan los cuerpos físicos, el cual varía según sus proporciones. (Coluccio, 2021)</p>	<p>En este caso, el volumen se determinará mediante la ecuación del modelo de optimización volumétrico.</p>	Volumen	Valor en centímetros cúbicos o mililitros	Dependiente Continua Razón



**ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN GERENCIA DE OPERACIONES Y LOGÍSTICA**

**Declaratoria de Autenticidad del Asesor**

Yo, ZELADA GARCIA GIANNI MICHAEL, docente de la ESCUELA DE POSGRADO MAESTRÍA EN GERENCIA DE OPERACIONES Y LOGÍSTICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA NORTE, asesor de Tesis titulada: "OPTIMIZACIÓN EN LA ELABORACIÓN DE BOTELLAS PET EN UNA PLANTA EMBOTELLADORA Y SU IMPACTO EN LA INDUSTRIA DE BEBIDAS Y EL MEDIO AMBIENTE", cuyo autor es SANTA CRUZ VEGA JULIO ERNESTO, constato que la investigación cumple con el índice de similitud establecido, y verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

LIMA, 09 de Agosto del 2022

<b>Apellidos y Nombres del Asesor:</b>	<b>Firma</b>
ZELADA GARCIA GIANNI MICHAEL <b>DNI:</b> 19098453 <b>ORCID</b> 0000-0003-2445-3912	Firmado digitalmente por: MZELADA el 14-08-2022 13:59:02